

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Stanovení tlakové ztráty na filtru s  
výměnným sítem, experimentálně a CFD  
modelováním**

**Determination of the Pressure Drop on the  
Filter with Replaceable Screen, Experimental  
and CFD Modeling**

Student:

Bc. David Horáček

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Horáček**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika

Téma: Stanovení tlakové ztráty na filtru s výměnným sítem, experimentálně  
a CFD modelováním  
Determination of the Pressure Drop on the Filter with Replaceable  
Screen, Experimental and CFD Modeling

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište daný problém a cíl úlohy.
2. Zpracujte teoretický základ k danému tématu.
3. Navrhněte a realizujte úpravu vodní tratě pro měření tlakové ztráty na filtru.
4. Proveďte měření pro filtr s drátěnými síty různých parametrů.
5. Zpracujte vyhodnocení výsledků formou grafů a tabulek.
6. Naměřená data použijte pro následnou CFD analýzu.
7. Proveďte hodnocení obou přístupů.

Seznam doporučené odborné literatury:

- DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*, VŠB-TU Ostrava, 2007, 260 s. Dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta. VŠB-TU Ostrava, 1995, 152 s. Návod pro laboratorní měření. Dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- VINOPAL, S., KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. SNTL Praha, 1963, 650 s.
- BOJKO, M. *3D proudění – Ansys Fluent, učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s. Dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- PAVLOK, B. *Potrubní systémy a armatury – část 1*. VŠB-TU Ostrava, 2011, 81 s. Dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- RODI, W., FUEYO, N. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*. Spain, 2002. 1009 s. ISBN 0-08-044114-9.
- BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online]. Dostupné z <http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>.
- Firemní literatura.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 21.5.2018

Podpis:



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za cenné odborné rady a čas poskytnutý při konzultacích a měřeních. Dále bych chtěl poděkovat panu Arnoštu Sítkovi za asistenci při měřeních.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2018



podpis

**Jméno a příjmení autora práce:**

Bc. David Horáček

**Adresa trvalého pobytu autora práce:**

Stará ves, Mlýnská 363/33

## **Anotace Diplomové práce**

HORÁČEK, D. *Stanovení tlakové ztráty na filtru s výměnným sítem, experimentálně a CFD modelováním*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2018, 86s, Vedoucí práce: Drábková, S.

Tato práce se zabývá zjištěním tlakové ztráty ( $\Delta p - Q$  charakteristiky) přírubového filtru *D71 DN 40 L=200* firmy ARMATURY Group a.s. pomocí experimentálního měření v laboratoři a za pomoci CFD modelování. Teoretická část se týká armatur, přírubových filtrů, místních ztrát a jejich měření. Dále se zde nachází popis základů CFD modelování, možností využití a základních bilančních rovnic. Následuje krátké shrnutí porézního prostředí, jímž síta jsou. V další části práce je popsána experimentální trať s použitými prvky a metodikou měření. Výsledky měření jsou vyhodnoceny v programu Excel. Na experiment navazuje řešení pomocí CFD modelování v programu ANSYS – Fluent. Výsledky obou přístupů při vyšetření  $\Delta p - Q$  charakteristik jsou porovnány a v závěru je pak provedeno jejich zhodnocení.

## **Anotation of Master thesis**

HORACEK, D. *Determination of the Pressure Drop on the Filter with Replaceable Screen, Experimental and CFD modeling*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2018, 86p, Leader: Drábková, S

This thesis has to determinate pressure loss ( $\Delta p - Q$  characteristics) of the flange filter *D71 DN 40 L = 200* of company ARMATURY Group a.s. using experimental measurement in the laboratory and CFD modelling. The theoretical part relates to fittings, flange filters, definition of local losses and their measurement. Then there is a description of CFD modelling basics, possibilities of application and basic balance equations. Next, is a brief summary of the porous media, which the wire screens are. In the next part of the thesis, an experimental track with applied elements and measurement methodology is described. The measurement results are evaluated in Excel. The experiment follows the CFD modelling solution in ANSYS - Fluent. The results of both approaches in the examination of  $\Delta p - Q$  characteristics are compared and at the end they are evaluated.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	10
Úvod .....	12
1. Armatury .....	13
1.1 Dělení armatur: .....	13
1.2 Přírubové filtry .....	13
2. Místní ztráty .....	16
3. Proudění porézní vrstvou - filtrační proudění .....	19
3.1 Pórovitost (propustnost) .....	19
3.2 Darcyho zákon .....	19
3.3 Tlaková ztráta v porézním prostředí .....	20
3.4 Permeabilita porézního prostředí .....	20
4. CFD .....	21
4.1 Základní rozdělení proudění .....	22
4.1.1 Reynoldsova rovnice – časové středování .....	23
4.1.2 Bossinesquova hypotéza vírové turbulentní viskozity .....	24
4.2 ANSYS Fluent .....	26
4.3 ANSYS SpaceClaim .....	27
5. Modelování porézního prostředí v Ansys-Fluent .....	28
5.1 Porézní skok (Porous – Jump) .....	28
5.2 Porézní oblast (Porous – Zone) .....	29
6. Experimentální měření tlakové ztráty přírubového filtru .....	31
6.1 Měřicí trať a specifikace jejích prvků .....	31
6.2 Měřená síta .....	34
6.3 Průběh měření .....	36
6.4 Vyhodnocení měření .....	36
6.4.1 Měření prázdné armatury .....	36
6.4.2 Měření se sítím 1 .....	38



6.4.3	Měření se sítím 2.....	40
6.4.4	Měření se sítím 3.....	41
6.4.5	Měření se sítím 4.....	43
6.4.6	Srovnání jednotlivých měření.....	45
7.	Řešení proudění přírubovým filtrem pomocí CFD modelování .....	47
7.1	Úprava geometrie.....	47
7.2	Tvorba výpočetní sítě a pojmenování okrajových podmínek.....	50
7.3	Nastavení výpočtového modelu.....	52
7.3.1	Typ proudícího media (Cell Zone Conditions) .....	52
7.3.2	Typy okrajových podmínek (Boundary Conditions).....	55
7.3.3	Nastavení matematického modelu.....	56
7.4	Vytvoření řezů pro odečet tlaků.....	56
8.	Vyhodnocení jednotlivých variant simulací.....	57
8.1	Vyhodnocení prázdné armatury.....	57
8.2	Porovnání přístupu řešení síta a permeability.....	61
8.2.1	Porous – Jump (porézní skok) .....	61
8.2.2	Porous – Zone (porézní oblast).....	63
8.3	Vyhodnocení síta 1 .....	65
8.4	Vyhodnocení síta 2 .....	68
8.5	Vyhodnocení síta 3, síto s opěrnou klecí .....	71
8.6	Vyhodnocení síta 4, s opěrnou klecí.....	76
Závěr: .....		79
Použitá literatura: .....		83
Přílohy na CD.....		86

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
$C_2$	Vnitřní odporový součinitel	$[m^{-1}]$
$C_D$	Konstanta	[1]
$C_{ie, v}$	Empirická konstanta	[1]
$d$	Průměr potrubí	[m]
$D_p$	Střední průměr částice	[m]
$e_z$	Měrná ztrátová energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
$f_{x, y, z}$	Složky zrychlení vnější objemové síly	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$f$	Frekvence	[Hz]
$g$	Tíhové zrychlení	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$h_{l, 2}$	Výška hladin	[m]
$h_P$	Hydraulický gradient	[1]
$h_z$	Ztrátová výška	[m]
$k$	Kinetická turbulentní energie	$[m^2 \cdot s^{-2}]$
$K_L$	Ztrátový součinitel	[1]
$k_P$	Koeficient filtrace	$[m \cdot s^{-1}]$
$L$	Vzdálenost	[m]
$l_e$	Ekvivalentní délka	[m]
$m$	Počet místních odporů	[1]
$p$	Tlak	[Pa]
$Q$	Průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_M$	Hmotnostní průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$S$	Průtočná plocha	$[m^2]$
$S_i$	Zdrojový člen	$[Pa \cdot m^{-1}]$
$T$	Absolutní teplota	[K]
$t$	Čas	[s]
$u$	Složka rychlosti	$[m \cdot s^{-1}]$
$V$	Objem	$[m^3]$
$v$	Rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$y^*$	Bezrozměrná veličina při odvození stěnové funkce	[1]
$\alpha$	Teplotní vodivost	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\alpha_P$	Permeabilita porézního prostředí	$[m^2]$

$\Delta m$	Tloušťka porézní vrstvy	[m]
$\Delta p$	Tlaková ztráta	[Pa]
$\varepsilon$	Rychlost disipace	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ]
$\varepsilon_P$	Propustnost	[1]
$\zeta$	Součinitel místní ztráty	[1]
$\lambda$	Součinitel ztráty třením	[1]
$\mu$	Dynamická viskozita	[Pa·s]
$\mu_t$	Turbulentní viskozita	[Pa·s]
$\xi$	Obecná proměnná	
$\rho$	Hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_{k,\varepsilon}$	Empirická konstanta	[1]
$\tau_t$	Turbulentní napětí	[Pa]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]

## Úvod

Přírubové filtry jsou důležitou součástí systémů sloužících k dopravě vody nebo páry, jejich účelem je před dopravením media dále do systému zbavit jej hrubých nečistot a zvyšovat tak životnost především regulačních členů. Pomocí CFD modelování (Computational Fluid Dynamics) pak můžeme lépe porozumět proudění uvnitř těchto prvků a tím je lépe optimalizovat.

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou ARMATURY Group a.s., která požadovala zjištění tlakové ztráty přírubového filtru *D71 118 540 DN 40 L=200*, tedy vyšetření  $\Delta p - Q$  charakteristik tohoto filtru při použití různých druhů sít dodaných touto firmou. Dalším cílem bylo vyšetřit tyto charakteristiky také pomocí CFD modelování pro zadanou 3D geometrii filtru.

Diplomová práce na začátku popisuje, co to jsou armatury a k čemu slouží, podrobněji se pak zabývá přírubovými filtry a jejich popisem. Vzhledem k tomu, že se jedná o člen potrubí, který vytváří ztrátu, je jedna z kapitol věnována i místním ztrátám, tedy co znamenají a jaké jejich parametry můžeme vyhodnocovat. Filtrační síto je popsáno jako tenké porézní prostředí, definované svou propustností, permeabilitou a tlakovou ztrátou. Jedna z kapitol je tak věnována právě poréznímu prostředí.

V další kapitole je rozebrána základní problematika CFD modelování a základní rovnice popisující proudění. Jako CFD software je použit ANSYS – Fluent a jemu je proto věnována další z kapitol. Pro úpravu geometrie byl použit nástroj ANSYS *SpaceClaim*, v práci se tak nachází i stručný popis toho, co tento nástroj umožňuje. Možnostem zadání porézního prostředí v ANSYS – Fluent se zabývá další kapitola, kde je popsán způsob zadání porézního media jako porézní oblasti (Porous – Zone) a jako takzvaný porézní skok (Porous – Jump).

Dále je pak popsáno experimentální měření tlakové ztráty armatury v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení a jsou popsány použité prvky obvodu. Následuje vyhodnocení naměřených hodnot tabulkami a grafickými závislostmi ( $\Delta p - Q$ ,  $\zeta - Re$  charakteristiky) doplněné o slovní popis.

Po experimentálním měření bylo provedeno řešení v programu ANSYS – Fluent. Je tedy uvedeno srovnání různých přístupů a dále pak srovnání s měřením.

## **1. Armatury**

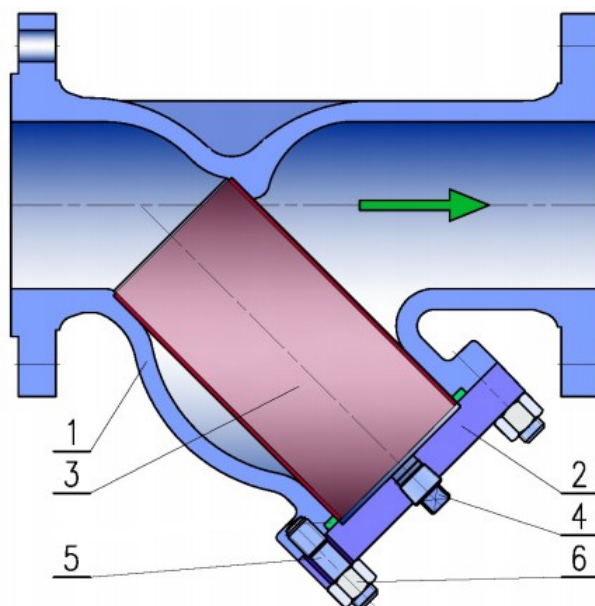
Armatury jsou obecně prvky potrubí, jako jsou regulační ventily, kolena, šoupátka, přírubové filtry a jiné prvky potrubí sloužící ke změně směru, velikosti a rychlosti proudění v potrubí. Ve své práci se věnuji právě přírubovým filtrům.

### **1.1 Dělení armatur:**

- armatury pro hrazení toku tekutiny: uzavírací ventily, šoupátka, kohouty, klapky,
- armatury pro řízení průtoku tekutiny tj. regulační armatury (ventily, šoupátka, klapky),
- armatury k filtraci kapalin (přírubové filtry)
- armatury pro řízení tlaku tekutiny: pojistné ventily, redukční ventily.<sup>21</sup>

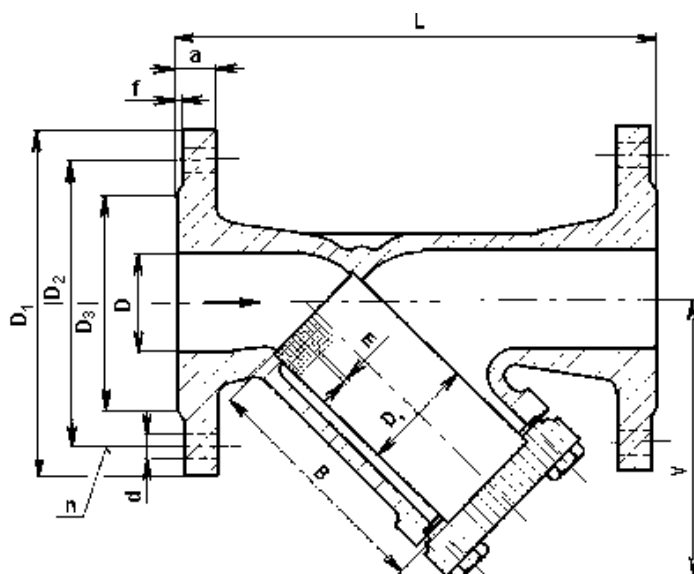
### **1.2 Přírubové filtry**

Přírubové filtry jsou prvky určené k čištění media od mechanických nečistot. Jejich hlavní předností je jejich celková robustní konstrukce a síto vyrobené z nerezové oceli s možností čistit jej. Jsou vyráběny se světlostí DN 15 až 400, v tlakových třídách PN 16, 25 a 40. Jejich materiálové provedení může být z šedé litiny, tvárné litiny a ocelolitiny. Tyto filtry jsou určeny pro použití v topenářství a především v horkovodních nebo parních okruzích. Jsou vhodné jak pro vodu tak i páru a vzduch. Díky jejich použití je především dosaženo vyšší životnosti uzavíracích orgánů ventilů. Jejich tvar většinou zaručuje nízkou tlakovou ztrátu.<sup>21</sup>



Obrázek 1.1 – Přírubový Y filtr (1 – těleso, 2 – Víko, 3 – Síto, 4 – Zátka, 5 – Šroub, 6 – Matice)<sup>22</sup>

Filtr tvoří dvě části: těleso a víko, které jsou odlity z nerezové oceli. Těleso má šikmé hrdlo, ve kterém je umístěno síto. Hrdlo je zakončeno závitem pro přišroubování jeho víka. Filtry se montují tak, aby směr proudění souhlasil se šipkou na tělese. Pro připojení k potrubí slouží vnitřní závity, pro utažení slouží nálitky ve tvaru šestihrannu.<sup>21</sup>



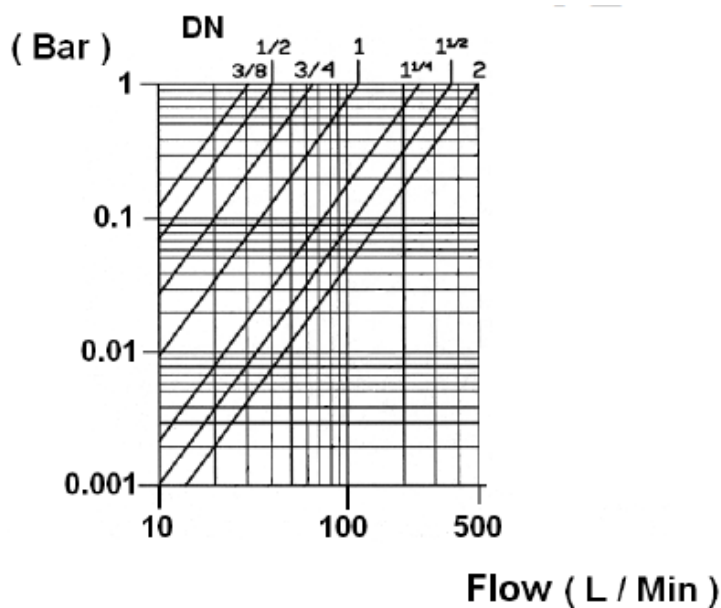
Obrázek 1.2 – Parametry přírubového filtru, schéma z katalogového listu výrobce Hauser<sup>30</sup>

Určujícími parametry filtrů jsou: jmenovitá světlost DN, ztrátový součinitel  $\zeta$ , jemnost síta a rozměry filtru (viz obrázek 1.2 a tabulka 1.1).

DN	D	L	V	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	a	f	n	d	m	D <sub>S</sub>	B	Ztrát. souč. $\zeta$	Hmotnost kg
15	15	130	75	95	65	45	14	2	4	14	0,80	20	59	1,8	2,3
20	20	150	85	105	75	58	16	2	4	14	0,80	27	68	2,0	3,0
25	25	160	105	115	85	68	16	2	4	14	0,80	34	88	2,3	4,7

Tabulka 1.1 – Parametry filtru katalogový list výrobce Hauser<sup>30</sup>

Někteří výrobci uvádějí u svých přírubových filtrů grafy závislosti tlakové ztráty na průtoku filtrem, viz graf 1.1.



Graf 1.1 – Závislosti tlakové ztráty na průtoku, katalogový list výrobce Sferaco<sup>31</sup>

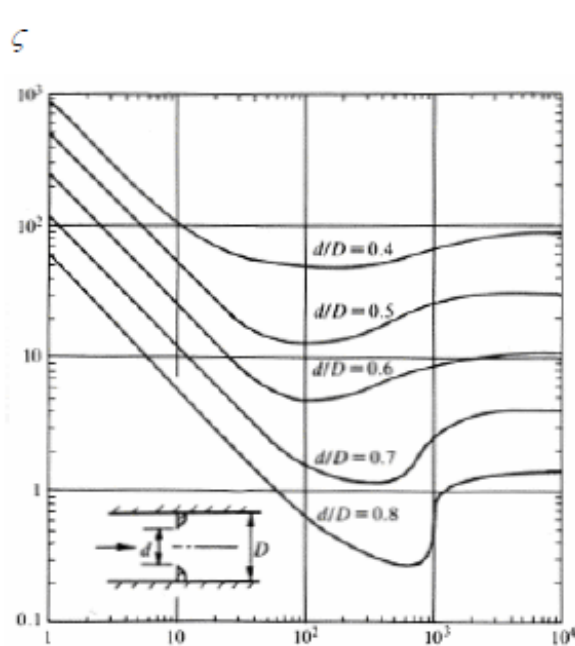




## Součinitel místní ztráty

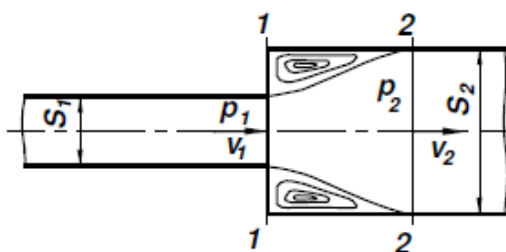
Je důležitou veličinou pro stanovení místní ztráty, stanovuje se výpočtem podle změřených hodnot tlakových ztrát daného prvku. Součinitele místních odporů různých tvarovek jsou uvedeny v normě ČSN 75 5455, ale mohou se od skutečnosti výrazně lišit, zejména pro nižší  $Re$  čísla, viz obrázek 2.2. Pro hodnoty Reynoldsova čísla  $Re \geq 10^5$  je ztrátový součinitel téměř konstantní.<sup>2, 1</sup>

$$\zeta_m = \frac{2 \cdot p_z}{v^2 \cdot \rho} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.2 – Ztrátový součinitel clony v závislosti na  $Re$ <sup>1</sup>

Ztrátový součinitel může být zjištěn i početně pro různé prvky potrubí, například pro náhlé rozšíření průřezu v závislosti na vtokové  $v_1$  nebo odtokové rychlosti  $v_2$  (obrázek 2.3).



Obrázek 2.3 – Náhlé rozšíření<sup>1</sup>

Dle vztahu odvozeného Bordou platí pro ztrátovou výšku<sup>1</sup>

$$h_z = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} = \zeta_1 \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

Z této rovnice vyplývá vztah

$$\zeta_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} \quad (2.3)$$

Vykrácením tíhového  $g$  zrychlení a vyjádřením rychlosti  $v_2$  z rovnice kontinuity

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad , \quad v_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot v_1 \quad (2.4)$$

Lze po dosazení do rovnice 2.3 a zkrácení rychlosti  $v_1$  dostat vztah

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (2.5)$$

Stejně tak lze stejným přístupem získat součinitel  $\zeta_2$

$$\zeta_2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \quad (2.6)$$

### **Ztrátová energie**

Velikost místních ztrát se vyjadřuje rychlostní výškou a ztrátovým součinitelem. <sup>1</sup>

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta_m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.7)$$

### **Ekvivalentní délka**

Místní odpory mohou být také vyjádřeny ekvivalentní délkou potrubí  $l_e$ , kde je ztráta třením stejně velká jako místní ztráta. <sup>1</sup>

$$\zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow l_e = \frac{\zeta}{\lambda} \cdot d \quad (2.8)$$

Za součinitel tření se dosazují hodnoty platné pro rovný úsek potrubí. <sup>1</sup>

### **Tlakové ztráty v místních odporech**

Tlakové ztráty vlivem místních odporů  $\Delta p$  se stanoví podle vztahu: <sup>2</sup>

$$\Delta p = \sum_{i=1}^m \zeta_i \frac{v_i^2}{2000} \cdot \rho_i \quad (2.9)$$

### 3. Proudění porézní vrstvou - filtrační proudění

Proudění porézní vrstvou představuje průtok tekutiny vrstvou zrnitého materiálu, jako jsou písky štěrky, tkaniny a síta. Pokud protéká porézní vrstvou pouze jedna tekutina, jedná se o jednofázový průtok. Vyskytují se ale i případy současného proudění kapaliny i plynu a pak se jedná o dvoufázové proudění. V případě této diplomové práce se jedná o jednofázové proudění.<sup>3</sup>

#### 3.1 Pórovitost (propustnost)

Pórovitost je vlastností látek, které nemají prostor zcela vyplněn hmotou, ale mezi jejími částicemi jsou větší nebo menší mezery, póry. Těmito póry může kapalina proniknout, čím více je pórů tím více tekutiny může těleso pojmout. V případě velkých pórů se tekutina pohybuje vlivem gravitačních sil, v malých je pohyb velmi pomalý vlivem sil kapilárních. Pak jsou póry děleny na kapilární a nekapilární. Dále znamenají velké póry možnost turbulentního pohybu, malé pak laminárního. Pórovitost je tedy míra prostorů v materiálu a je změřena jako zlomek v rozmezí 0 až 1, nebo procentuálně mezi 0 až 100%.<sup>6,7</sup>

Pro určení jak velkou část objemu porézního prostředí tvoří póry, a jakou část plná místa, se používají pojmy pórovitost a zaplnění. Pórovitost je definována jako podíl objemu pórů  $V_p$  k celkovému objemu vzorku  $V_c$ , viz rovnice 3.1.<sup>6</sup>

$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_c} \varepsilon_p \in \langle 0,1 \rangle \quad (3.1)$$

#### 3.2 Darcyho zákon

Darcyho zákon je vztah definující rychlost průtoku kapaliny nasycenou zónou porézního tělesa. Vyjadřuje lineární závislost mezi filtrační rychlostí kapaliny  $v_f$  a piezometrickým (hydraulickým) gradientem  $h_p$ .<sup>28</sup>

Je vyjádřena vztahem:

$$v_f = k_p \cdot h_p \quad (3.2)$$

$k_p$  je koeficient filtrace, vyjádřený vztahem:

$$k_p = \frac{Q \cdot L}{S(p_a - p_b)} \quad (3.3)$$

kde  $Q$  je průtok,  $S$  je průtočná plocha,  $p_a$  je tlak v místě vtoku media,  $p_b$  tlak v místě výtoku media,  $L$  vzdálenost mezi vtokem a výtokem.<sup>28</sup>

Pro hydraulický gradient  $h$  platí vztah:

$$h_p = \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (3.4)$$

kde  $h_1$  je výška nad vstupem do filtru a  $h_2$  je úroveň hladiny na výtoky.

### 3.3 Tlaková ztráta v porézním prostředí

Tlaková ztráta v porézním prostředí je definovaná uvedenou rovnicí, která se skládá z viskózního a setrvačného členu <sup>6,9</sup>

$$\Delta p = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} + \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot |v| \cdot v_j \right) \quad (3.5)$$

kde:

$D_{ij}$ ,  $C_{ij}$  jsou předepsané matice,  $v_j$  je rychlost proudění a  $|v|$  je amplituda rychlosti.

Při homogenním proudění pak:

$$\Delta p = - \left( \frac{\mu}{\alpha_p} \cdot v_j + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot |v| \cdot v_j \right) \cdot \Delta m \quad (3.6)$$

kde

$C_2$  je vnitřní odporový součinitel,  $\Delta m$  je tloušťka porézního prostředí,  $\alpha_p$  je permeabilita porézního prostředí.

### 3.4 Permeabilita porézního prostředí

Permeabilita  $\alpha_p$  je převrácenou hodnotu odporu, který klade prostředí vůči proudění kapaliny. Vztah permeability a propustnosti není jednoduchý a závisí na mnoha dalších faktorech, např. na propojenosti pórů, jejich tvaru a vzdálenosti, což ovlivňuje schopnost vedení kapaliny. <sup>27</sup>

Problematika porézního prostředí je podrobně zpracována v Bakalářské práci: *Určení odporu porézního prostředí*, Viktor Polášek, viz <sup>6</sup>.

## 4. CFD

CFD je počítačová dynamika tekutin (Computational Fluid Dynamics).

Numerické modelování fyzikálních jevů je spojeno s modelováním některého z forem pohybu matematickými metodami. Pohyb tekutin je pak spjat s řešením různých problémů, daných fyzikálním modelem.<sup>29</sup>

- laminární a turbulentní proudění v jednoduchých i složitých geometriích
- stlačitelné a nestlačitelné proudění
- stacionární, nestacionární a přechodové proudění
- přenos tepla, přirozená a smíšená konvekce, radiace
- vícefázové proudění, proudění s volnou hladinou, proudění s pevnými částicemi,
- proudění porézním prostředím apod.

Matematický model je pak dán rovnicemi popisujícími výše uvedené děje. Tyto děje mohou být: rovinné dvourozměrné, osově symetrické nebo obecně trojrozměrné a časově závislé, jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic, kterou je nutné řešit numerickými metodami.<sup>29, 12</sup>

Vycházejí z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony zachování: zákon zachování hmoty, hybnosti a energie.<sup>10, 11, 29</sup>

Lze je vyjádřit matematicky pomocí:

- Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity (nestacionární nestlačitelné proudění):<sup>29</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

kde  $u$ ,  $v$  a  $w$  jsou složky rychlosti

- Vztah působení vnějších sil na proudění (setrvačná síla je rovna součtu hmotnostní, tlakové a třecí síly) – rovnice přenosu hybnosti.<sup>29</sup>

Tato rovnováha sil je definována Navier – Stokesovými rovnicemi. Výsledkem je pak soustava nelineárních parciálních diferenciálních rovnic:<sup>29</sup>

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z\end{aligned}\quad (4.2)$$

kde  $u, v$  a  $w$  jsou složky rychlosti a  $f_{x,y,z}$  označuje složky zrychlení vnější objemové síly. (např. gravitační, odstředivé síly).<sup>29</sup>

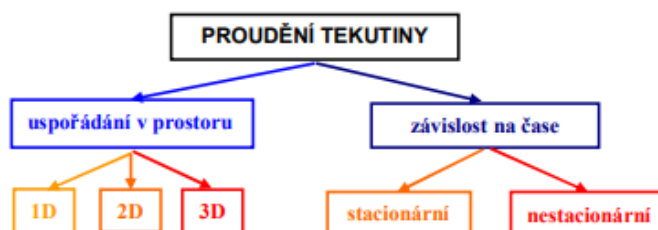
- Rovnice pro přenos tepla, tj. zákon zachování energie je ve tvaru:<sup>29</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \alpha \phi \quad (4.3)$$

kde  $\alpha$  je teplotní vodivost,  $u, v$  a  $w$  jsou složky rychlosti a  $\phi$  je disipační funkce.

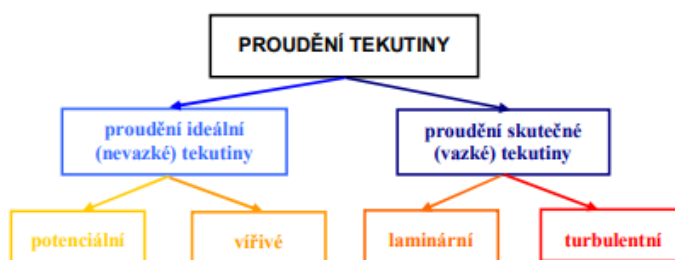
#### 4.1 Základní rozdělení proudění

Podle kinematických hledisek:



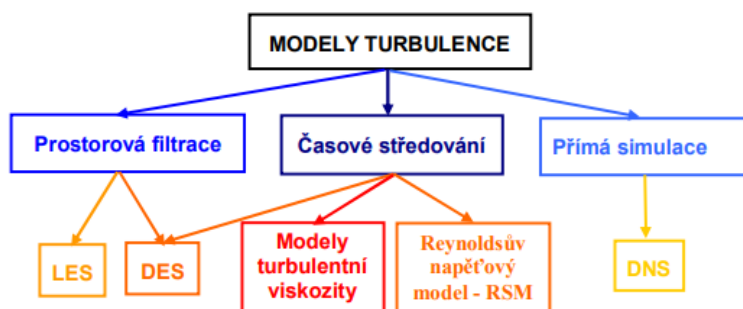
Obrázek 4.1 – Dělení proudění<sup>29</sup>

Podle fyzikálních vlastností:



Obrázek 4.2 – Dělení proudění<sup>29</sup>

Výše uvedené rovnice 4.1 až 4.3 popisují obecně laminární i turbulentní proudění. V případě turbulentního proudění je nutné zvolit některou z dostupných metod modelování turbulence.

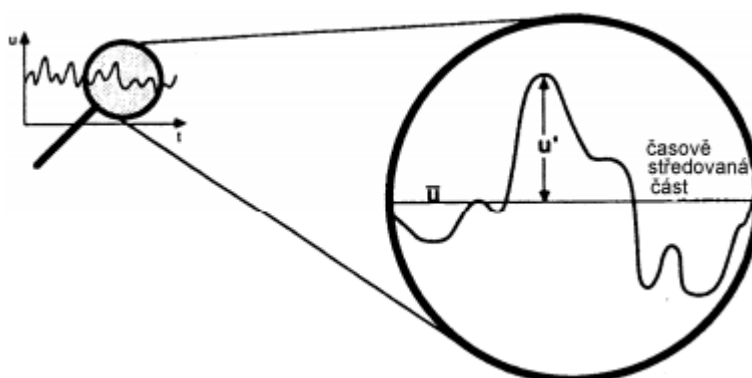


Obrázek 4.3 Modely turbulence<sup>29</sup>

Nejčastěji používaným přístupem je časové středování bilančních rovnic popisujících proudění, které vede k odvození Reynoldsových napětí.

#### 4.1.1 Reynoldsova rovnice – časové středování

Časové středování se využívá proto, aby bylo možno řešit turbulentní proudění Navier – Stokesovými rovnicemi (turbulentní proudění má náhodný charakter, ale je staticky stabilní). Dle Reynoldse lze okamžité hodnoty popisující turbulentní proudění rozložit na část časově středovanou a fluktuační složku, viz obrázek 4.4.<sup>29</sup>



Obrázek 4.4 – Fluktuace a časově středovaná část<sup>29</sup>

$$\xi = \bar{\xi} + \xi'$$

$$\bar{\xi} = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \xi d\tau \quad \bar{\xi}' = 0 \quad (4.4)$$

Rovnice kontinuity po časovém středování:

$$\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_j} = 0 \quad (4.5)$$

Pro časově středovanou část má tvar

$$\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} = 0 \quad (4.6)$$

Navier – Stokesova rovnice pro středované veličiny má tvar:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i' u_j'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} + f_i, \quad (4.7)$$

kde -  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  jsou tzv. Reynoldsova turbulentní napětí, tato napětí existují pouze při turbulentním proudění. <sup>29</sup>

#### 4.1.2 Bossinesquova hypotéza vírové turbulentní viskozity

Vírovou turbulentní viskozitou rozumíme, popis lokálního stavu turbulence sloužící k základnímu matematickému modelu turbulence. Je vyjádřena pomocí rychlostního měřítka  $u$  a délkového měřítka  $l$ . <sup>29</sup>

$$\mu_t \approx l \cdot u \quad (4.8)$$

Modelů vyjadřujících turbulentní napětí a toky tepla, případně jiných skalárních veličin, pomocí zvoleného měřítka a určující rozložení tohoto parametru v proudovém poli využívá právě Boussinesquova hypotéza. Předpokladem této hypotézy je, že podobně jako při laminárním proudění, jsou turbulentní napětí a toky úměrné gradientu střední rychlosti, teploty, koncentrace a jiných. <sup>29</sup>

Platí pak:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \text{ (laminární pr.) } \tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \cdot \frac{du}{dy} \text{ (turbulentní pr.)} \quad (4.9)$$



Turbulentní viskozita není fyzikální vlastností kapaliny (na rozdíl od laminárního proudění), je považována za fyzikální vlastnost proudění, závisí na velikosti turbulence a mění se v celém proudovém poli. Pohybová rovnice se použitím Boussinesquovy hypotézy upraví do tohoto tvaru: <sup>29</sup>

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \nu_t \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (4.10)$$

### Dvourovnicový $k - \varepsilon$ model

Turbulentní viskozita je v tomto modelu určena pomocí dvou transportních rovnic pro  $k$  a  $\varepsilon$  (přenos kinetické turbulentní energie a rychlosti disipace). V tomto modelu je využito Boussinesquovy hypotézy a vztahuje turbulentní viskozitu  $\mu_t$  k přenosu kinetické turbulentní energie  $k$ , rychlosti disipace  $\varepsilon$  a konstantě  $C_\mu$ . <sup>29</sup>

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

Rozložení přenosu kinetické turbulentní energie je dáno transportní rovnicí. Transportní rovnici pro rychlost disipace  $\varepsilon$  je možno odvodit z Navier – Stokesových rovnic (rovnice obsahuje komplexní korelace a je nutné je opět aproximovat). <sup>29</sup>

Tvar rovnice pro rychlost disipace používaný v  $k - \varepsilon$  modelu:

$$k: \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon: \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.13)$$

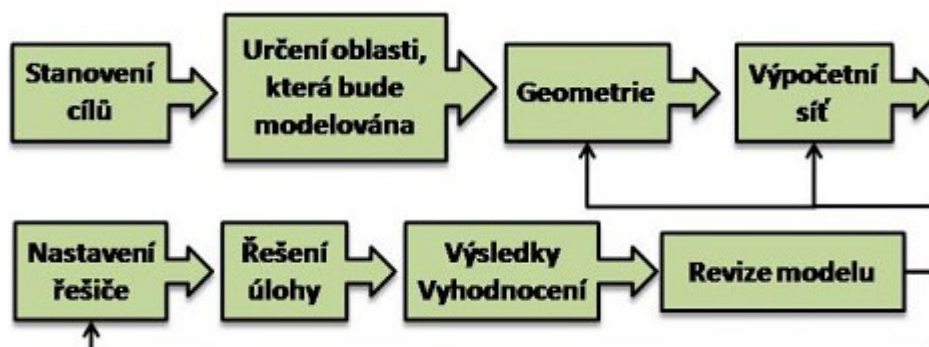
kde  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  a  $C_D$  jsou konstanty.

## 4.2 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent je tedy CFD softwarem, jenž umožňuje řešení všech typů CFD analýz, zároveň i možnost analyzovat vzájemnou interakci proudění, strukturální mechaniky a magnetismu v tomto prostředí. Umožňuje také automatizovaný simulační proces. Nástroje ANSYS dovolují použití velkého počtu turbulentních modelů, od stacionárních až po vysoce sofistikované nestacionární modely. Zároveň poskytuje ANSYS velký výběr modelů pro vícefázové proudění a pokročilé modely spalování.<sup>11</sup>

Umožňuje také tvarové optimalizace pomocí nástrojů *DesignExplorer* nebo *Adjoint Solver*.<sup>11</sup>

Při použití CFD je nutné nejprve definovat geometrii (vytvořit model), vytvářenou buďto přímo v prostředí CFD softwaru, nebo importovanou z CAD softwaru. Tuto geometrii je vhodné zjednodušit, odstraněním částí, které nemají na proudění vliv. Po odstranění těchto částí, je obvykle vytvořena výpočetní síť. Dále jsou nastaveny počáteční a okrajové podmínky, použité materiály a jejich fyzikální vlastnosti. Následně je proveden výpočet a vyhodnoceny výsledky. Výsledky jsou vyhodnoceny buďto graficky (kontury, vektory, proudnice apod.), nebo numericky jako grafy závislostí a integrální hodnoty (silové účinky, momenty apod.). U 3D úloh je vhodné mít k dispozici alespoň orientační hodnoty počítaných veličin, ke srovnání výsledků s experimentem.<sup>11</sup>



Obrázek 4.5 – Postup při výpočtech proudění tekutiny pomocí simulačních nástrojů<sup>11</sup>

### 4.3 ANSYS SpaceClaim

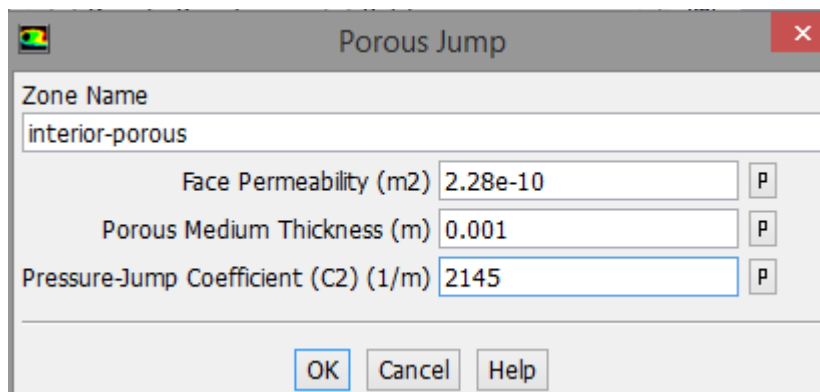
ANSYS *SpaceClaim* je víceúčelový 3 – D modelovací nástroj, umožňující efektivněji řešit úpravu modelů či jejich vytváření, je založený na technologii *Direct Modeling*. Umožňuje export geometrii z různých CAD softwarů ve formátu \*.STEP, a jejich další editaci a opravy, bez znalosti historie tvorby geometrie a bez znalosti mezi jednotlivými prvky modelu. Je možno vytvářet i vlastní geometrie. Změny geometrie jsou zobrazeny v reálném čase, během práce je tedy možno mít stále podrobnou představu o podobě kompletního modelu. Ve své práci jsem ANSYS *SpaceClaim* dále používal právě k úpravě geometrie.<sup>18</sup>

V případě modelování proudění je tedy *SpaceClaim* využíván hlavně ke zjednodušování vyšetřovaných geometrií. Jsou tak většinou odebírány vnější části potrubí nebo armatur s různými zaobleními, či skoseními, které nemají vliv na proudění. Dále mohou být upraveny vstupy a výstupy z těchto prvků tak, aby došlo k ustálení proudění.

## 5. Modelování porézního prostředí v Ansys-Fluent

Funkce porézní vrstvy může být ANSYS FLUENT řešena dvěma způsoby a to definovaní buďto jako:

### 5.1 Porézní skok (Porous – Jump)



Obrázek 5.1 – Vstupní data pro Boundary Condition Porous– Jump

Zjednodušení modelu porézního média, nazývaného porézní skok (Porous – Jump), může být použito pro modelování tenké membrány se známými charakteristikami ztráty tlaku. Model porézního skoku se aplikuje na vytvořenou geometrii. Porézní skok dosahuje rychlejší konvergence než porézní oblast.<sup>15, 16</sup>

Tenké porézní prostředí má konečnou tloušťku, ve které je tlaková ztráta definována jako kombinace *Darcyho* zákona a vnitřní ztrátové podmínky:<sup>15, 16</sup>

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha_p} \cdot v + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2\right) \cdot \Delta m \quad (5.1)$$

kde:

$\mu$  je dynamická viskozita tekutiny,  $\alpha_p$  je permeabilita,  $\Delta m$  je tloušťka porézní vrstvy,  $C_2$  je vnitřní odporový součinitel,  $v$  je normálová rychlost vzhledem k porézní ploše.

Vnitřní odporový součinitel  $C_2$  pro porézní vrstvu jako je mnou měřené síto je možno spočítat ze změřené tlakové ztráty vztahem:<sup>17</sup>

$$C_2 = \frac{K_L}{\text{tloušťka vrstvy}} \quad (5.2)$$

kde  $K_L$  je ztrátový součinitel definovaný z tlakové ztráty:

$$\Delta p = K_L \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \right) \quad (5.3)$$

Pak  $K_L$ :

$$K_L = \frac{\Delta p \cdot 2}{\rho \cdot v^2} \quad (5.4)$$

### Permeabilita $\alpha_P$ :

Pro výpočet permeability je možno použít více přístupů:

- Výpočtem pomocí polynomicke spojnice trendu 2. řádu, závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na rychlosti proudění  $v$ , postup této metody je zpracován v kapitole 8.
- Pomocí vzorce:

$$\alpha_P = \frac{D_p^2}{150} \cdot \frac{\varepsilon_P^2}{(\varepsilon_P - 1)^2} \quad (5.5)$$

kde:

$\varepsilon_P$  je propustnost prostředí,  $D_p$  je střední průměr částice.

- Vyjádřením ze vztahu 5.1 je možno dostat vztah:

$$\alpha_P = \frac{\mu \cdot v}{\left( \frac{\Delta p}{\Delta m} + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \right)} \quad (5.6)$$

## 5.2 Porézní oblast (Porous – Zone)

Využívá se v případech, kde je nutné nastavit porézní prostředí o daných koeficientech v celém objemu. Vychází se z Darcyho zákona porézního prostředí. Do standardní momentové rovnice je přidán zdrojový člen  $S_i$ , který je složený ze dvou částí, laminární a turbulentní ztráty. Člen  $S_i$  je definován pro směry  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Pro homogenní porézní prostředí platí zjednodušený tvar: <sup>15,16</sup>

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha_P} \cdot v_j + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho |v| \cdot |v_j| \right) \quad (5.7)$$

kde  $|v|$  je amplituda rychlosti a  $v_j$  je složka rychlosti v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

### Laminární proudění

Ztráta tlaku je úměrná rychlosti a vnitřní odporový součinitel  $C_2$  je nulový. Model porézního prostředí je potom zjednodušen na Darcyho zákon: <sup>15,16</sup>

$$\Delta p = -\frac{\mu}{\alpha_p} \cdot \vec{v} \quad (5.8)$$

Tlaková ztráta pro směry x, y, z:

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{pxj}} \cdot v_j \cdot \Delta m_x \\ \Delta p_y &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{pyj}} \cdot v_j \cdot \Delta m_y \\ \Delta p_z &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{pzj}} \cdot v_j \cdot \Delta m_z \end{aligned} \quad (5.9)$$

kde  $1/\alpha_{pij}$  je položka v matici  $D$ ,  $v_j$  je složka rychlosti v osách x, y, z,  $\Delta m_{x, y, z}$  jsou tloušťky média v osách x, y, z. <sup>15,16</sup>

### Turbulentní proudění:

V případě vyšších rychlostí, turbulentního proudění: <sup>15,16</sup>

$$\Delta p = \sum_{i=1}^3 C_{2xi} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i \cdot |v| \right) \quad (5.10)$$

Tlaková ztráta pro směry x, y, z:

$$\begin{aligned} \Delta p_x &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \cdot \Delta m_x \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_j \cdot |v| \right) \\ \Delta p_y &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \cdot \Delta m_y \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_j \cdot |v| \right) \\ \Delta p_z &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \cdot \Delta m_z \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_j \cdot |v| \right) \end{aligned} \quad (5.11)$$

kde,  $C_{2ij}$  jsou vnitřní odporové součinitele pro směry x, y, z.

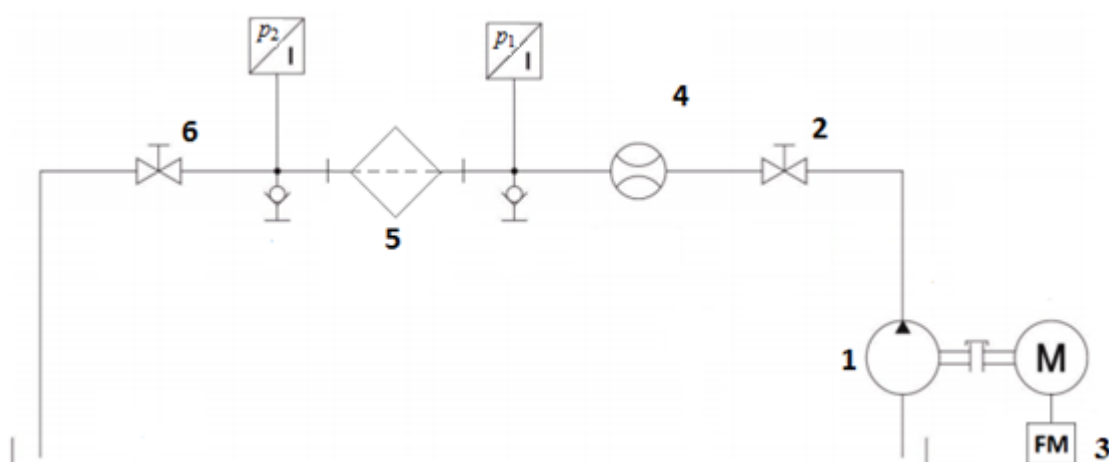
V případě porézní oblasti je možno využít stejných výpočtu permeability jako v případě porézního skoku (Porous – Jump).

## 6. Experimentální měření tlakové ztráty přírubového filtru

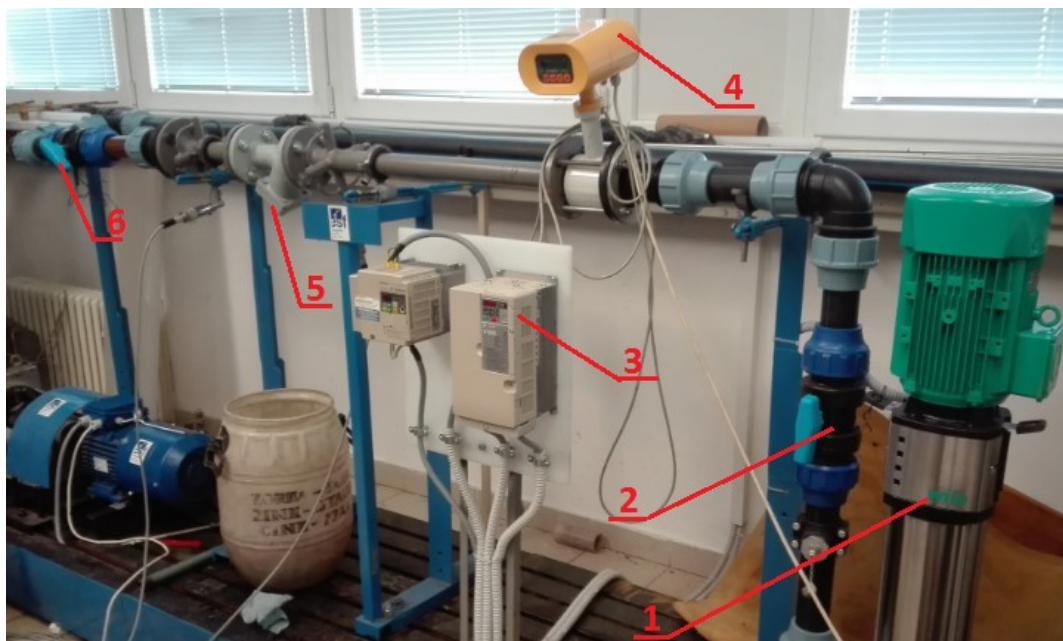
Pro srovnání tlakové ztráty přírubového filtru  $D71\ 118\ 540\ DN\ 40\ L=200$  s různými sítý bylo provedeno experimentální měření. Byla využita měřicí trať v laboratoři Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava, Katedry Hydromechaniky a hydraulických zařízení, schematicky popsána na obrázku 6.1 její reálné sestavení, viz obrázek 6.2. Tato trať byla v minulosti sestavena pro diplomovou práci týkající se měření regulačního ventilu a to dle normy ČSN EN 60534-2-3, jedná se sice o normou týkající se regulačních armatur, ale je užívána i pro ostatní průmyslové armatury. Použitým médiem byla voda.

### 6.1 Měřicí trať a specifikace jejích prvků

Trať byla upravena použitím dostupných prvků a přírubového filtru  $D71\ 118\ 540\ DN\ 40\ L=200$ , dodaného společností ARMATURY Group a.s. společně s výměnnými sítý.

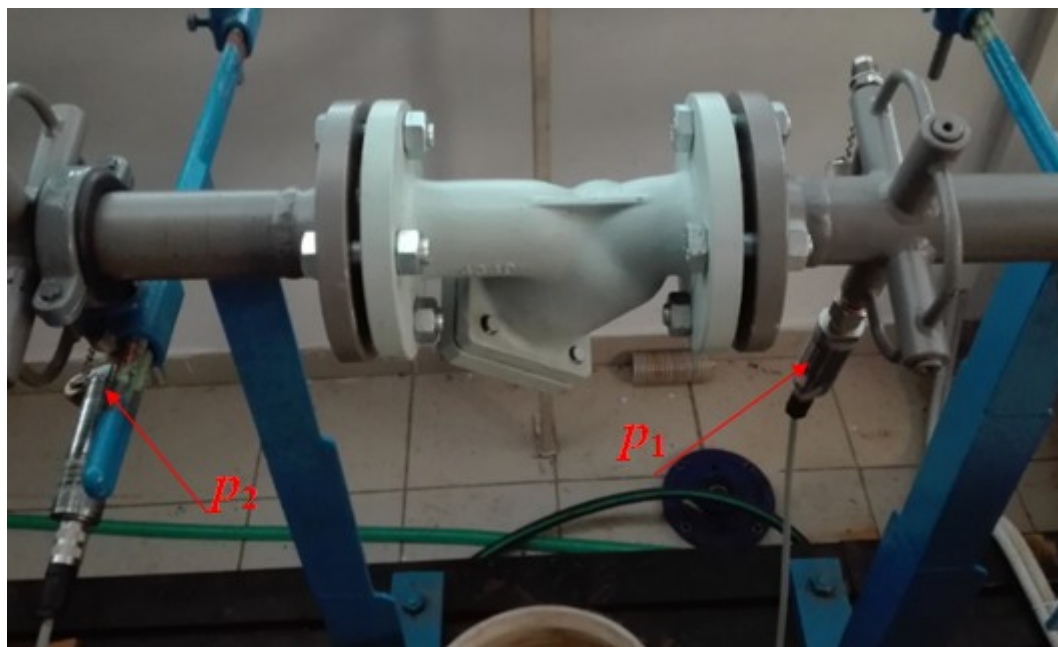


Obrázek 6.1 – Experimentální trať schematicky, 1 – čerpadlo WILO HELIX V1608, 2 – Uzavírací ventil, 3 – Frekvenční měnič, 4 – Průtokoměr, 5 – Přírubový filtr, 6 – Uzavírací ventil



Obrázek 6.2 – Experimentální trať, 1 – čerpadlo WILO HELIX V1608, 2 – Uzavírací ventil, 3 – frekvenční měnič, 4 – průtokoměr, 5 – Přírubový filtr, 6 – Uzavírací ventil

Na měřicí trati byli před ( $p_1$ ) a za přírubovým filtrem ( $p_2$ ) umístěny odběry tlaku (viz obrázek 6.3), tyto odběry tlaku byly umístěny ve vzdálenostech odpovídajících normě. K měření průtoku byl použit průtokoměr umístěný před vstupem do filtru (obrázek 6.1 – 4). Zdrojem tlaku bylo čerpadlo WILO HELIX V1608, jeho průtok byl řízen otáčkami elektromotoru (řízen frekvenčním měničem, obrázek 6.2 – 3).



Obrázek 6.3 – Měřený filtr s odběry tlaku ( $p_1$  tlak na vstupu  $p_2$  tlak na výstupu)



## Specifikace prvků obvodu

### Průtokoměr

Typ: Indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1

Světlost: DN 50

Průtok: min / max =  $0,72/72 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Přesnost:  $\pm 0,2 \%$  pro  $10 - 100 \% Q_{\max}$   
 $\pm 0,5 \%$  pro  $5 - 100 \% Q_{\max}$



Obrázek 6.4 – Průtokoměr

### Snímání tlaku

Převodník: Hydrotechnik MultiSystem 5050

Tlakový snímač: PR 300

Rozsah měření: -1 až 6 bar

Signál: 4 až 20mA

Přesnost:  $\pm 3\%$  pro  $-20$  až  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 6.5 – MultiSystem 5050

### Čerpadlo

Výrobce a typ: *WILO HELIX V1608*

Jmenovitý průtok:  $Q = 16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Kmitočet: 50/60 Hz



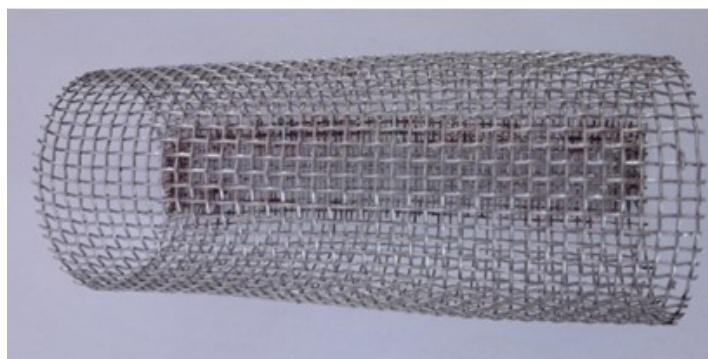
Obrázek 6.6 – Čerpadlo *WILO HELIX V1608*<sup>19</sup>

## 6.2 Měřená síta

### Síto 1 bez opěrné klece (2 x 2 mm)

Parametry měřeného síta:

- Rozměry oka: 2 x 2 mm
- Tloušťka drátu: 0,56 mm
- Materiál: 1.4301
- Propustnost  $\varepsilon_P = 0,65$

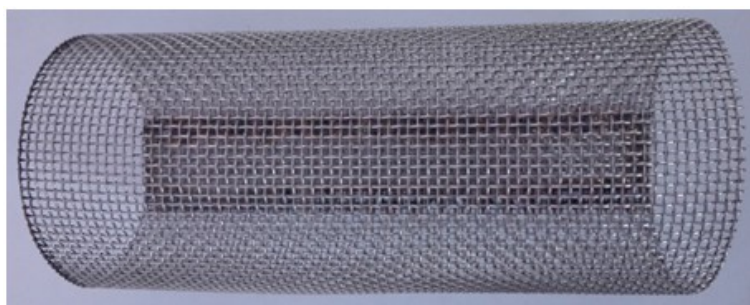


*Obrázek 6.7 – Síto 1*

### Síto 2 bez opěrné klece (1 x 1 mm)

Parametry měřeného síta:

- Rozměry oka: 1x1 mm
- Tloušťka drátu: 0,4 mm
- Materiál: 1.4301
- Propustnost  $\varepsilon_P = 0,51$



*Obrázek 6.8 – Síto 2*

### **Síto 3 s opěrnou klecí (0,1 x 0,1 mm)**

Parametry měřeného síta:

- Rozměr oka: 0,1 x 0,1 mm
- Tloušťka drátu: 0,063 mm
- Materiál: 1.4301
- Propustnost  $\varepsilon_p = 0,38$

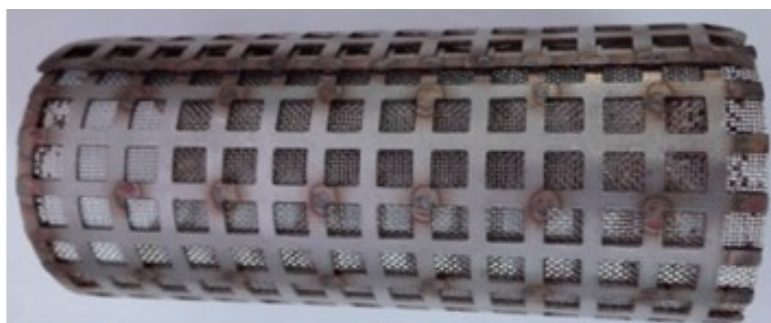


*Obrázek 6.9 – Síto 3*

### **Síto 4 s opěrnou klecí (0,5 x 0,5 mm)**

Parametry měřeného síta:

- Rozměr oka: 0,5 x 0,5 mm
- Tloušťka drátu: 0,25 mm
- Materiál: 1.4301
- Propustnost  $\varepsilon_p = 0,44$



*Obrázek 6.10 – Síto 4*

### 6.3 Průběh měření

Měření bylo prováděno při frekvencích elektromotoru  $f = 9$  až  $35$  Hz, tzn. při zvyšujícím se průtoku do armatury. Měřeny pak byly tlak před filtrem  $p_1$ , za filtrem  $p_2$  a průtok od čerpadla  $Q$ . Nejnižší frekvenci  $f = 9$  Hz odpovídal průtok  $Q = 0,0013 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $v \doteq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), nejvyšší  $f = 35$  Hz pak průtok  $Q = 0,0053 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $v \doteq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Tlaky  $p_1$  a  $p_2$  byly měřeny v barech, hodnoty průtoku  $Q$  pak v  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Hodnoty byly zaznamenány vždy po ustálení, následně byl zvýšen průtok. Jako první bylo změřeno těleso filtru bez síta – prázdná armatura. Po tomto měření byla do armatury postupně vložena filtrační síta 1 až 4.

### 6.4 Vyhodnocení měření

Tato kapitola se věnuje vyhodnocení naměřených hodnot, vytvořením  $\Delta p - Q$  charakteristik a závislosti ztrátového součinitele  $\zeta$  na Reynoldsově číslu. Hodnoty průtoku  $Q$  byly převedeny na  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tlaková ztráta  $\Delta p$  byla rovnou spočítána v základní jednotce Pascalech.

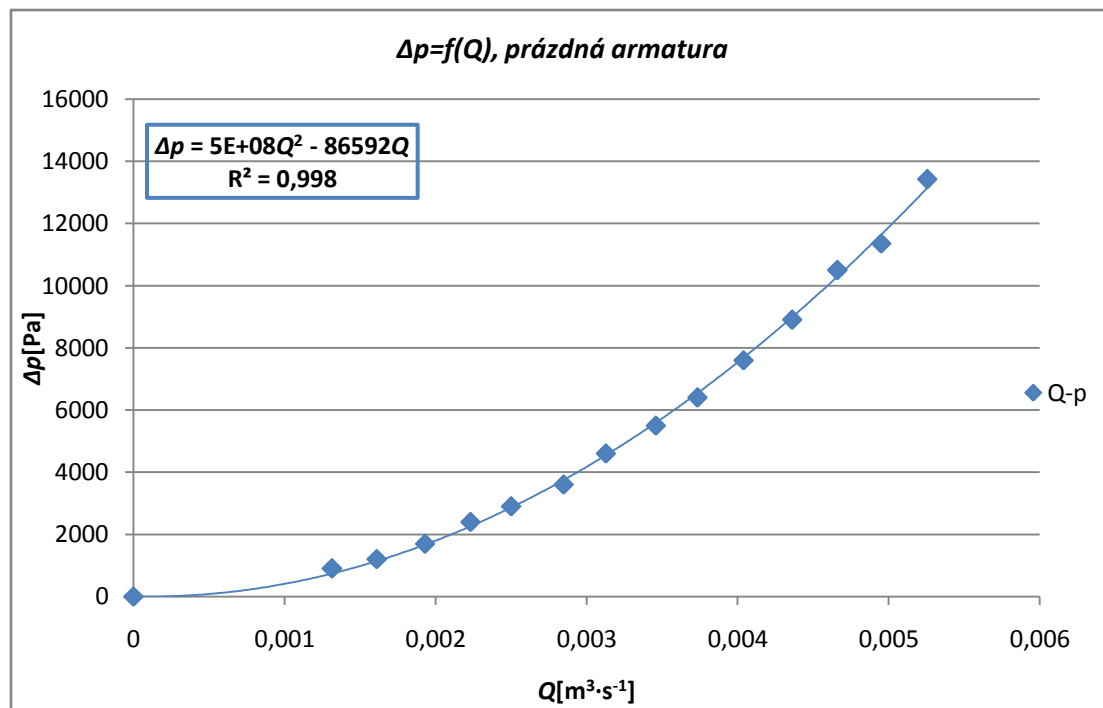
#### 6.4.1 Měření prázdné armatury

Toto měření bylo provedeno jako první, pro zjištění, jakou tlakovou ztrátu vykazuje samotné těleso přírubového filtru.

$f$	$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Re$	$\zeta$	$Q$
[Hz]	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	[bar]	[bar]	[Pa]	[1]	[1]	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
9	4,730	1,046	0,012	0,003	900	41822,382	1,647	0,0013
11	5,800	1,282	0,052	0,040	1200	51283,259	1,460	0,0016
13	6,950	1,536	0,098	0,081	1700	61451,492	1,441	0,0019
15	8,030	1,775	0,155	0,131	2400	71000,789	1,523	0,0022
17	9,000	1,989	0,217	0,188	2900	79577,472	1,465	0,0025
19	10,250	2,266	0,287	0,251	3600	90629,898	1,403	0,0028
21	11,260	2,489	0,367	0,321	4600	99560,259	1,485	0,0031
23	12,450	2,752	0,453	0,398	5500	110082,169	1,452	0,0035
25	13,440	2,971	0,546	0,482	6400	118835,691	1,450	0,0037
27	14,540	3,214	0,646	0,570	7600	128561,826	1,471	0,0040
29	15,700	3,470	0,748	0,659	8903	138818,478	1,478	0,0044
31	16,780	3,709	0,865	0,760	10500	148367,775	1,526	0,0047
33	17,820	3,939	0,985	0,871	11361	157563,394	1,464	0,0050
35	18,920	4,182	1,120	0,986	13426	167289,529	1,535	0,0053

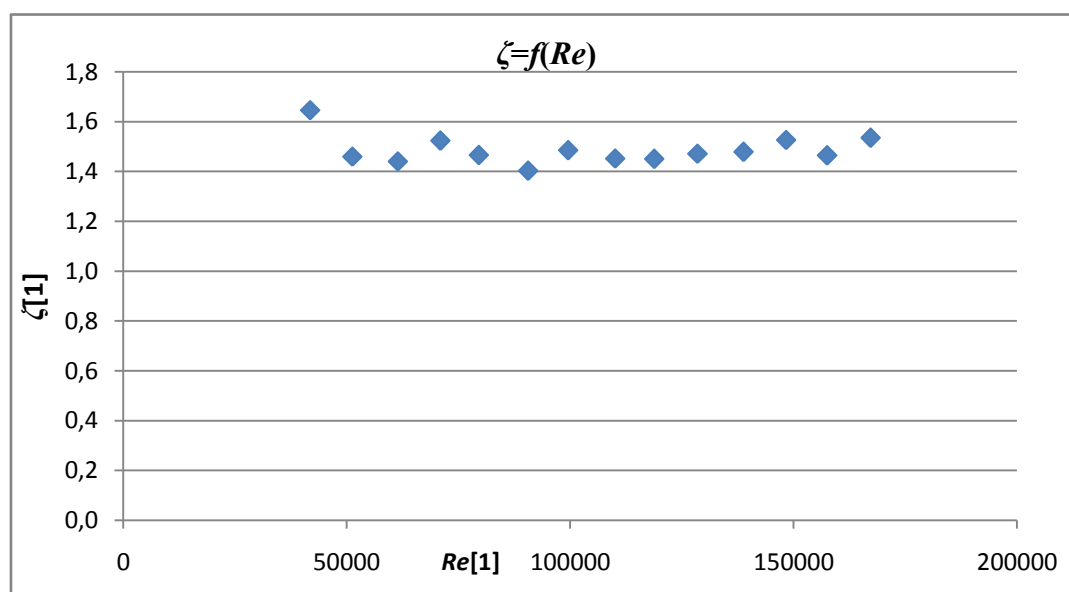
Tabulka 6.1 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro prázdné těleso filtru

Z hodnot uvedených v tabulce lze vidět, že tlaková ztráta narůstala se zvyšujícím se průtokem. Pro výpočet ztrátového součinitele  $\zeta$  byl využit vztah 2.1. Tlaková ztráta dosáhla maximální hodnoty 13426 Pa, hodnota ztrátového součinitele dosáhla v průměru hodnoty  $\zeta = 1,49$ , při směrodatné odchylce  $s = 0,056$ .



Graf 6.1 – Závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristika)

V grafu 6.1 lze vidět, jak tlaková ztráta spolu s průtokem narůstá s polynomičtí závislostí 2 řádu.



Graf 6.2 – Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

Průběh grafu 6.2 ukazuje, že ztrátový součinitel je téměř konstantní, změny jsou spíše nahodilé a lze dále uvažovat průměrnou hodnotu tohoto součinitele.

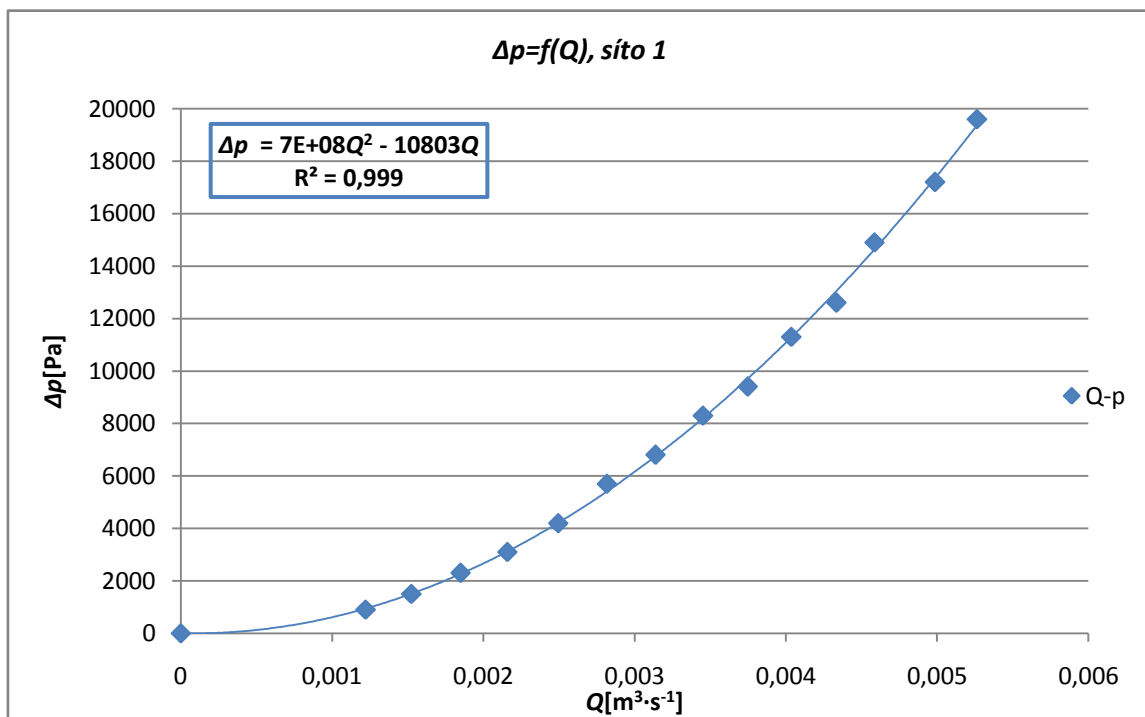
#### 6.4.2 Měření se sítím 1

Stejným způsobem, jako v případě prázdné armatury, bylo provedeno vyhodnocení variant se sítí.

$f$	$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Re$	$\zeta$	$Q$
[Hz]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[bar]	[bar]	[Pa]	[1]	[1]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
9	4,400	0,973	0,065	0,056	900	38904,542	1,903	0,0012
11	5,490	1,214	0,106	0,091	1500	48542,258	2,037	0,0015
13	6,660	1,472	0,156	0,133	2300	58887,329	2,122	0,0019
15	7,770	1,718	0,213	0,182	3100	68701,884	2,102	0,0022
17	8,980	1,985	0,280	0,238	4200	79400,633	2,132	0,0025
19	10,140	2,241	0,302	0,245	5700	89657,285	2,269	0,0028
21	11,300	2,498	0,386	0,318	6800	99913,936	2,180	0,0031
23	12,430	2,748	0,475	0,392	8300	109905,330	2,199	0,0035
25	13,490	2,982	0,569	0,475	9400	119277,788	2,114	0,0037
27	14,530	3,212	0,676	0,563	11300	128473,407	2,191	0,0040
29	15,600	3,448	0,785	0,659	12600	137934,284	2,119	0,0043
31	16,510	3,650	0,908	0,759	14900	145980,451	2,237	0,0046
33	17,950	3,968	1,036	0,864	17200	158712,846	2,185	0,0050
35	18,950	4,189	1,172	0,976	19600	167554,787	2,234	0,0053

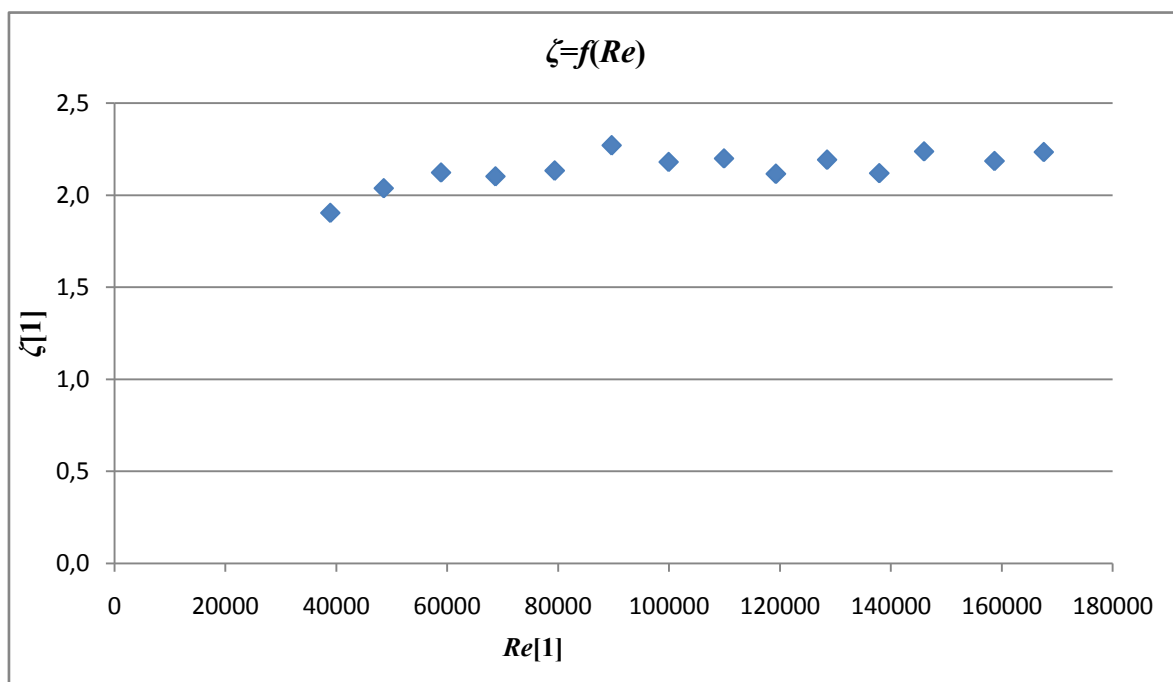
Tabulka 6.2 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro síto 1

Podobně jako u prázdného tělesa filtru tlaková ztráta narůstala se zvyšujícím se průtokem od čerpadla, její nejvyšší hodnota byla 19 600 Pa. Ztrátový součinitel dosahuje průměrné hodnoty  $\zeta = 2,15$ , při směrodatné odchylce  $s = 0,09$ .



Graf 6.3 – Závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristika)

V grafu tlakové ztráty lze vidět její nárůst s průtokem, nedochází zde k žádné výrazné změně.



Graf 6.4 – Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

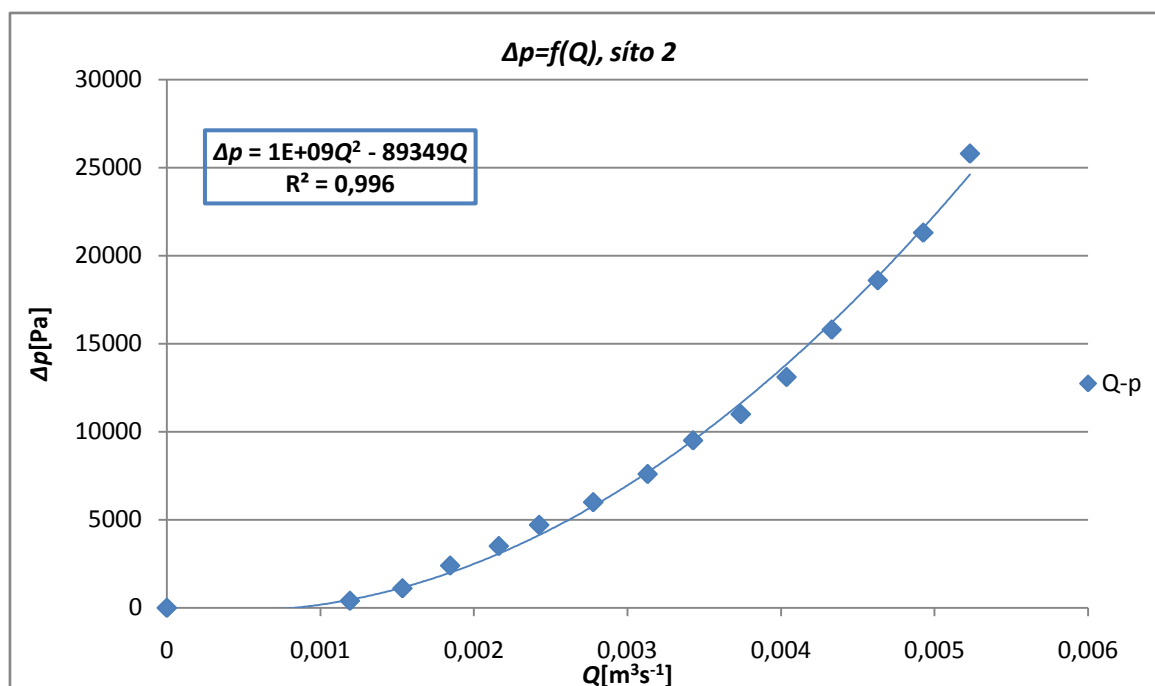
Graf 6.4 ukazuje, že ztrátový součinitel  $\zeta$  v závislosti na Reynoldsově čísle nemá rostoucí ani klesající tendenci, lze tedy uvažovat jeho průměrnou hodnotu.

### 6.4.3 Měření se sítím 2

$f$	$Q$	$v$	$p_2$	$p_1$	$\Delta p$	$Re$	$\zeta$	$Q$
[Hz]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[bar]	[bar]	[Pa]	[1]	[1]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
9	4,290	0,948	0,066	0,062	400	37931,928	0,890	0,0012
11	5,520	1,220	0,103	0,092	1100	48807,516	1,478	0,0015
13	6,640	1,468	0,157	0,133	2400	58710,490	2,228	0,0018
15	7,780	1,720	0,215	0,180	3500	68790,303	2,367	0,0022
17	8,730	1,930	0,282	0,235	4700	77190,147	2,524	0,0024
19	10,000	2,210	0,355	0,295	6000	88419,413	2,456	0,0028
21	11,270	2,491	0,388	0,312	7600	99648,678	2,449	0,0031
23	12,340	2,728	0,480	0,385	9500	109109,555	2,554	0,0034
25	13,460	2,975	0,578	0,468	11000	119012,530	2,485	0,0037
27	14,530	3,212	0,683	0,552	13100	128473,407	2,540	0,0040
29	15,590	3,446	0,801	0,643	15800	137845,865	2,661	0,0043
31	16,670	3,685	0,928	0,742	18600	147395,161	2,740	0,0046
33	17,740	3,921	1,060	0,847	21300	156856,038	2,770	0,0049
35	18,830	4,162	1,208	0,950	25800	166493,754	2,978	0,0052

Tabulka 6.3 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro síto 2

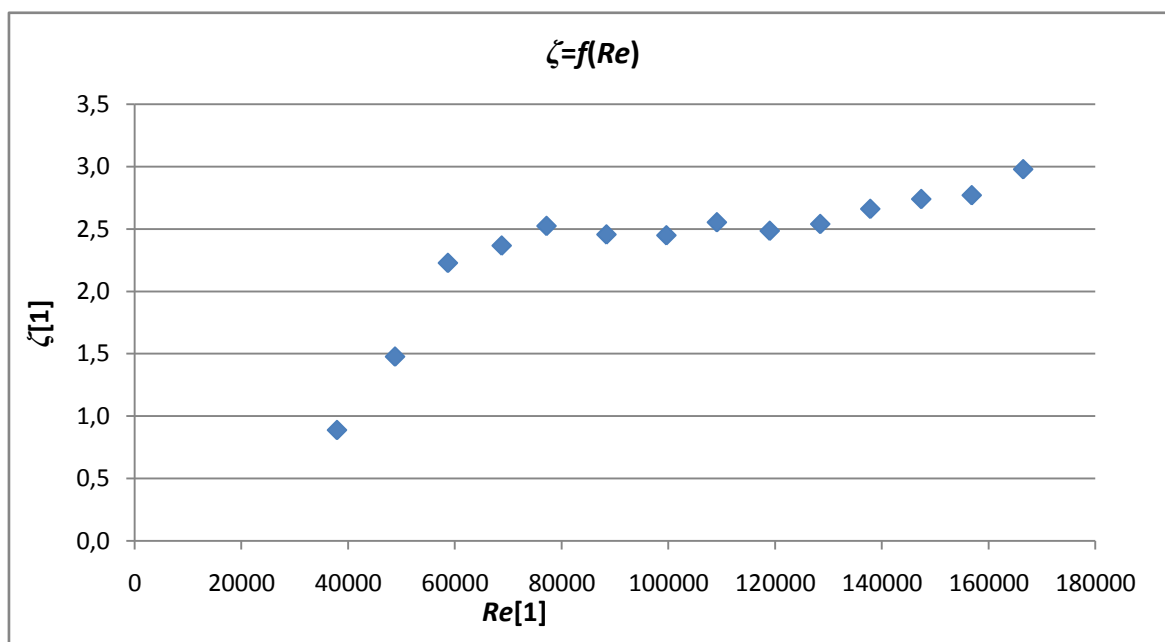
Tlaková ztráta filtru s tímto sítím dosahuje postupně až hodnoty  $\Delta p = 25800$  Pa, ztrátový součinitel je pak průměrně  $\zeta = 2,37$ , při směrodatné odchylce  $s = 0,53$ .



Graf 6.5 – Závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristika)



V grafu 6.5 je průběh tlakové ztráty srovnatelný s průběhem u síta 1, tlaková ztráta tak postupně narůstá a nedochází k žádné významné změně



Graf 6.6 – Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

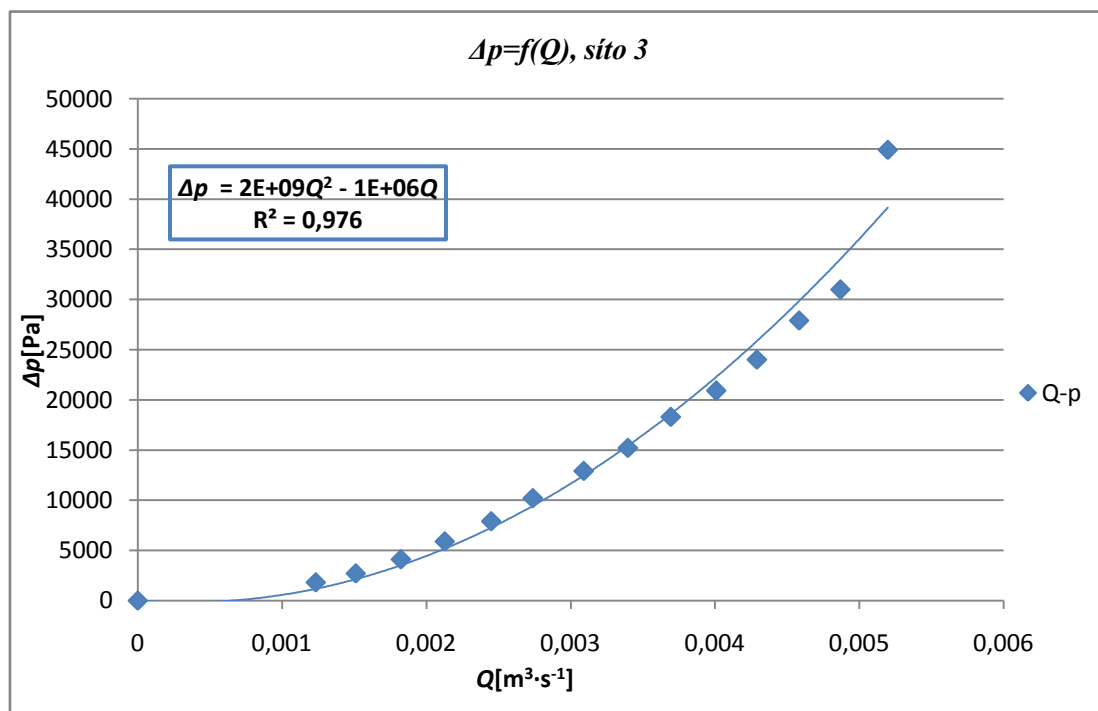
V grafu 6.6 lze vidět, jak se ztrátový součinitel při Reynoldsově čísle do  $Re = 89\,000$  postupně zvyšoval, od vyšších  $Re$  je pak pouze mírně rostoucí.

#### 6.4.4 Měření se sítem 3

$f$	$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Re$	$\zeta$	$Q$
[Hz]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[bar]	[bar]	[Pa]	[1]	[1]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
9	4,440	0,981	0,078	0,060	1800	39258,219	3,737	0,0012
11	5,440	1,203	0,114	0,087	2700	48100,161	3,734	0,0015
13	6,570	1,452	0,172	0,131	4100	58091,554	3,888	0,0018
15	7,660	1,693	0,234	0,175	5900	67729,270	4,116	0,0021
17	8,820	1,950	0,308	0,229	7900	77985,922	4,157	0,0025
19	9,860	2,180	0,39	0,288	10200	87181,541	4,294	0,0027
21	11,130	2,460	0,431	0,302	12900	98410,806	4,262	0,0031
23	12,230	2,703	0,526	0,374	15200	108136,942	4,160	0,0034
25	13,300	2,940	0,636	0,453	18300	117597,819	4,235	0,0037
27	14,430	3,190	0,747	0,538	20900	127589,213	4,108	0,0040
29	15,450	3,415	0,872	0,632	24000	136607,993	4,115	0,0043
31	16,500	3,647	1,007	0,728	27900	145892,031	4,195	0,0046
33	17,530	3,875	1,144	0,834	31000	154999,231	4,129	0,0049
35	18,710	4,136	1,293	0,844	44900	165432,721	5,250	0,0052

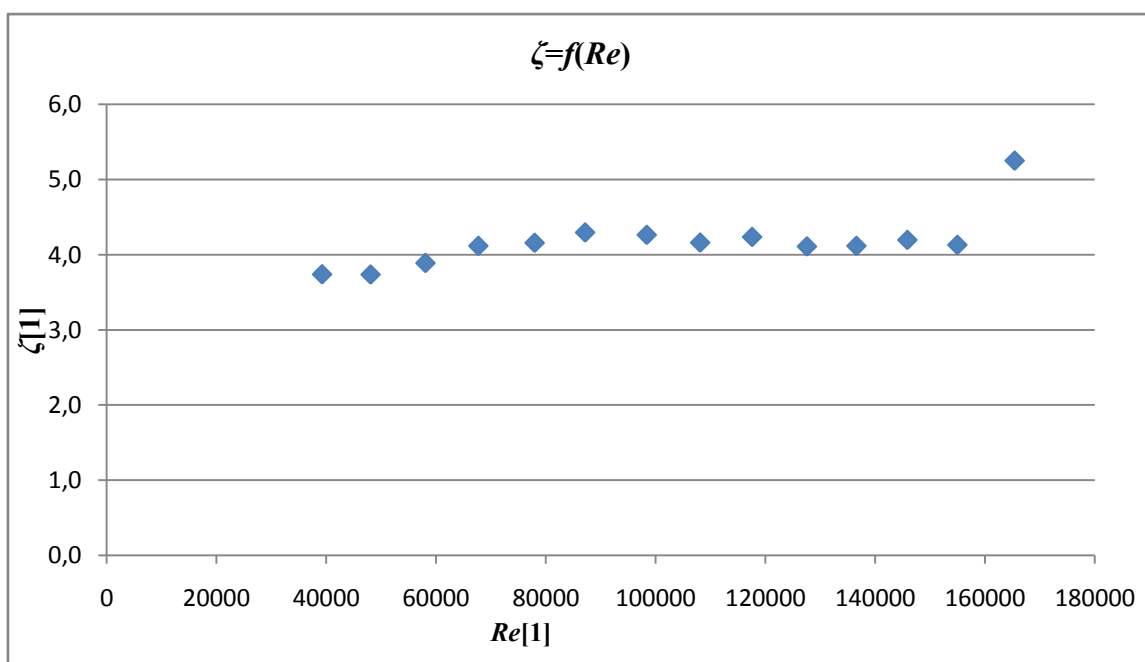
Tabulka 6.4 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro síto 3

Tlaková ztráta se sítím s opěrnou klecí dosáhla maximální hodnoty  $\Delta p = 44\,900$  Pa, ztrátový součinitel dosáhl průměrně hodnoty  $\zeta = 4,17$ , při směrodatné odchylce  $s = 0,345$ .



Graf 6.7 – Závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristika)

Tlaková ztráta se podobně jako u předchozích měření zvyšovala, ale v případě nejvyššího průtoku došlo k jejímu výraznějšímu nárůstu, tento nárůst mohl být způsoben počínajícím zavířením ve filtru nebo odchylkou v měření.



Graf 6.8 – Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

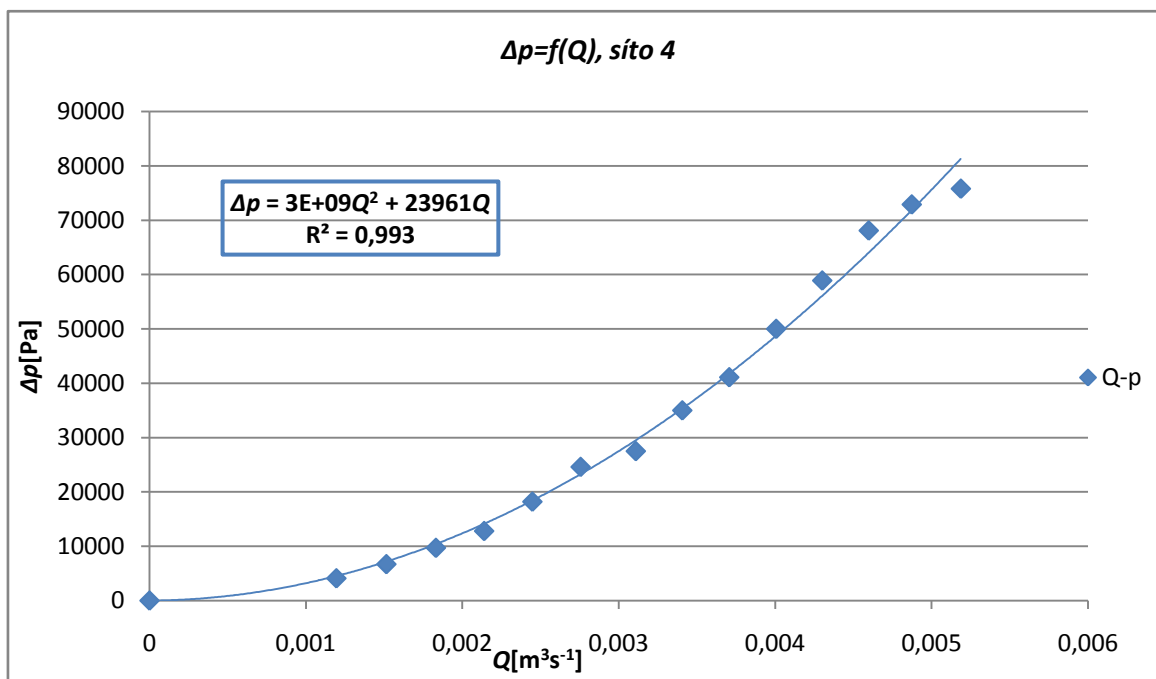
Ztrátový součinitel dosahoval do  $Re = 160000$  přibližně stejných hodnot, k jeho výraznějšímu nárůstu pak došlo při  $Re = 165\,000$ , tj. nejvyšším průtoku podobně jako v případě tlakové ztráty se mohlo jednat o chybu měření.

#### 6.4.5 Měření se sítím 4

$f$	$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Re$	$\zeta$	$Q$
[Hz]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[bar]	[bar]	[Pa]	[1]	[1]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
9	4,300	0,951	0,076	0,035	4100	38020,348	9,076	0,0012
11	5,450	1,205	0,112	0,045	6700	48188,580	9,233	0,0015
13	6,590	1,457	0,166	0,069	9700	58268,393	9,142	0,0018
15	7,700	1,702	0,227	0,099	12800	68082,948	8,837	0,0021
17	8,810	1,947	0,299	0,117	18200	77897,503	9,598	0,0024
19	9,920	2,193	0,376	0,13	24600	87712,058	10,232	0,0028
21	11,190	2,474	0,413	0,138	27500	98941,323	8,989	0,0031
23	12,260	2,710	0,51	0,16	35000	108402,200	9,531	0,0034
25	13,340	2,949	0,615	0,204	41100	117951,497	9,453	0,0037
27	14,420	3,188	0,727	0,227	50000	127500,793	9,842	0,0040
29	15,480	3,422	0,85	0,261	58900	136873,251	10,061	0,0043
31	16,550	3,658	0,982	0,301	68100	146334,128	10,177	0,0046
33	17,540	3,877	1,126	0,397	72900	155087,650	9,699	0,0049
35	18,670	4,127	1,275	0,517	75800	165079,044	8,901	0,0052

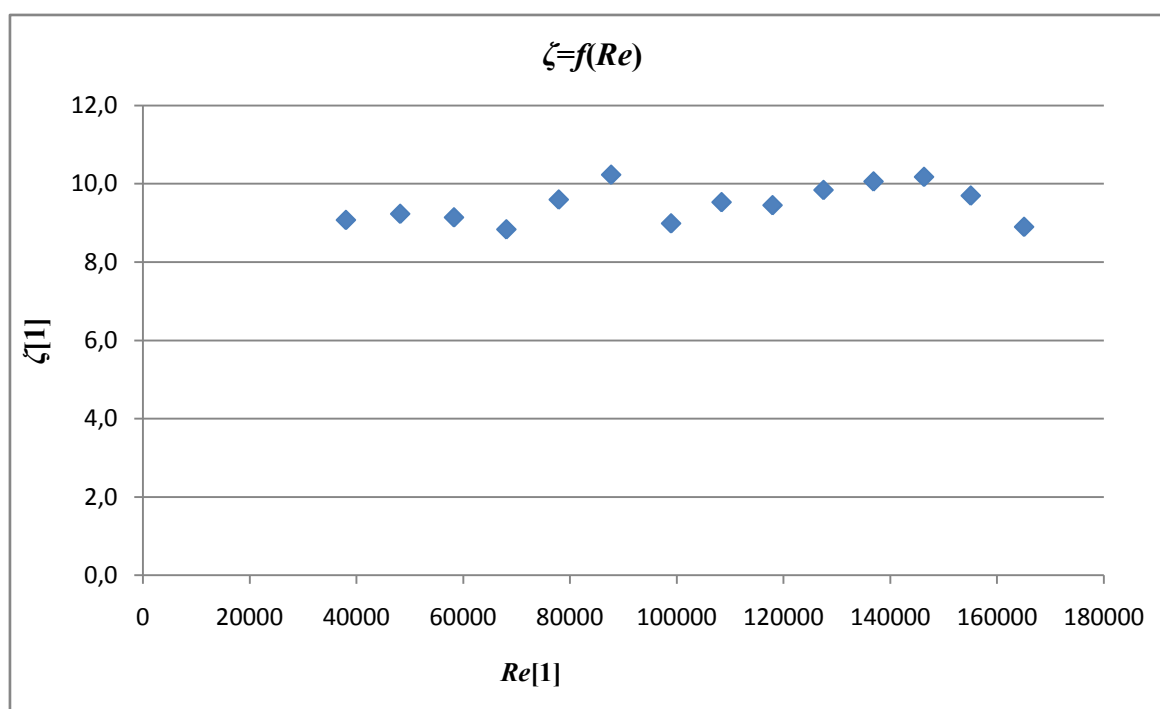
Tabulka 6.5 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro síto 4

Tlaková ztráta při vložení tohoto síta dosáhla postupně hodnoty  $\Delta p = 75800$  Pa, podobně jako u předchozích měření pro největší průtok. Ztrátový součinitel dosáhl maximálně hodnoty  $\zeta = 10,2$ , jeho průměrná hodnota pak  $\zeta = 9,484$ , při směrodatné odchylce  $s = 0,46$ . Toto síto se tak jeví jako energeticky nejnáročnější, pravděpodobnou příčinou je opěrná klec, vzhledem ke své vyšší propustnosti byl předpoklad nižších tlakových ztrát než v případě síta 3.



Graf 6.9 – Závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta pQ$  charakteristika)

V grafu 6.9 lze vidět, že při nejvyšších průtocích se tlaková ztráta zvyšovala jen mírně.

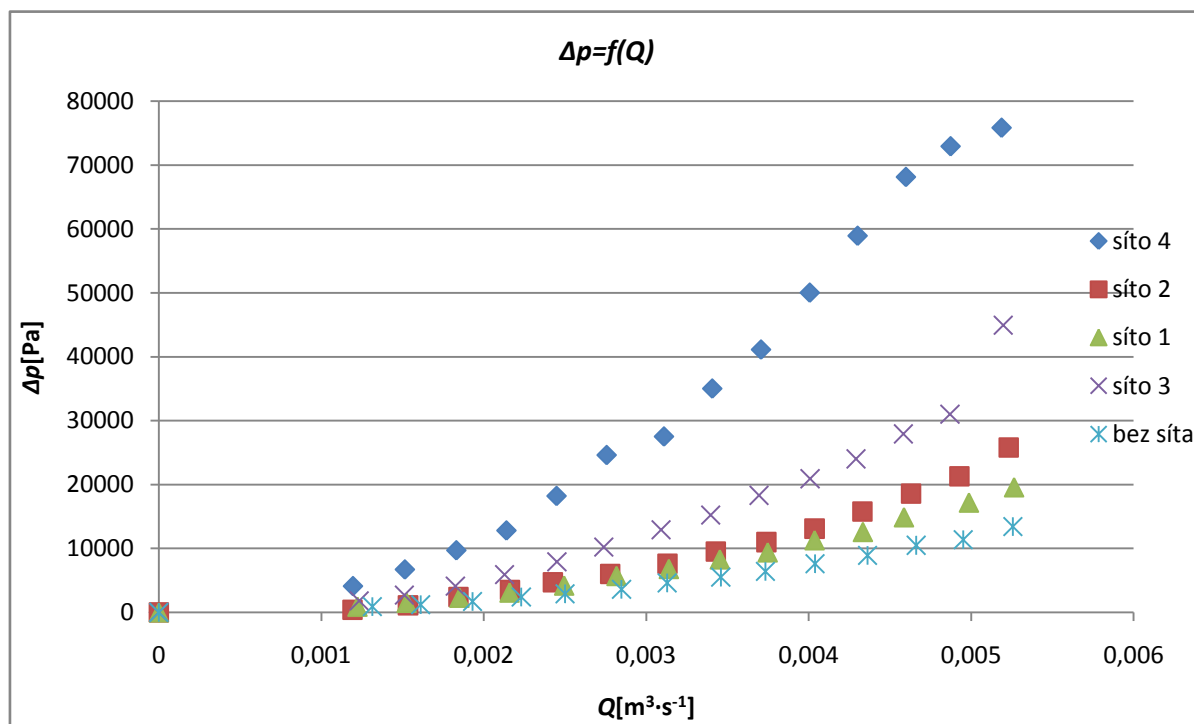


Graf 6.10 – Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

Ztrátový součinitel armatury s použitím hrubého sítky s opěrnou klecí, se v závislosti na  $Re$  měnil pouze nahodile a nelze jednoznačně určit jeho rostoucí tendenci s rostoucím průtokem.

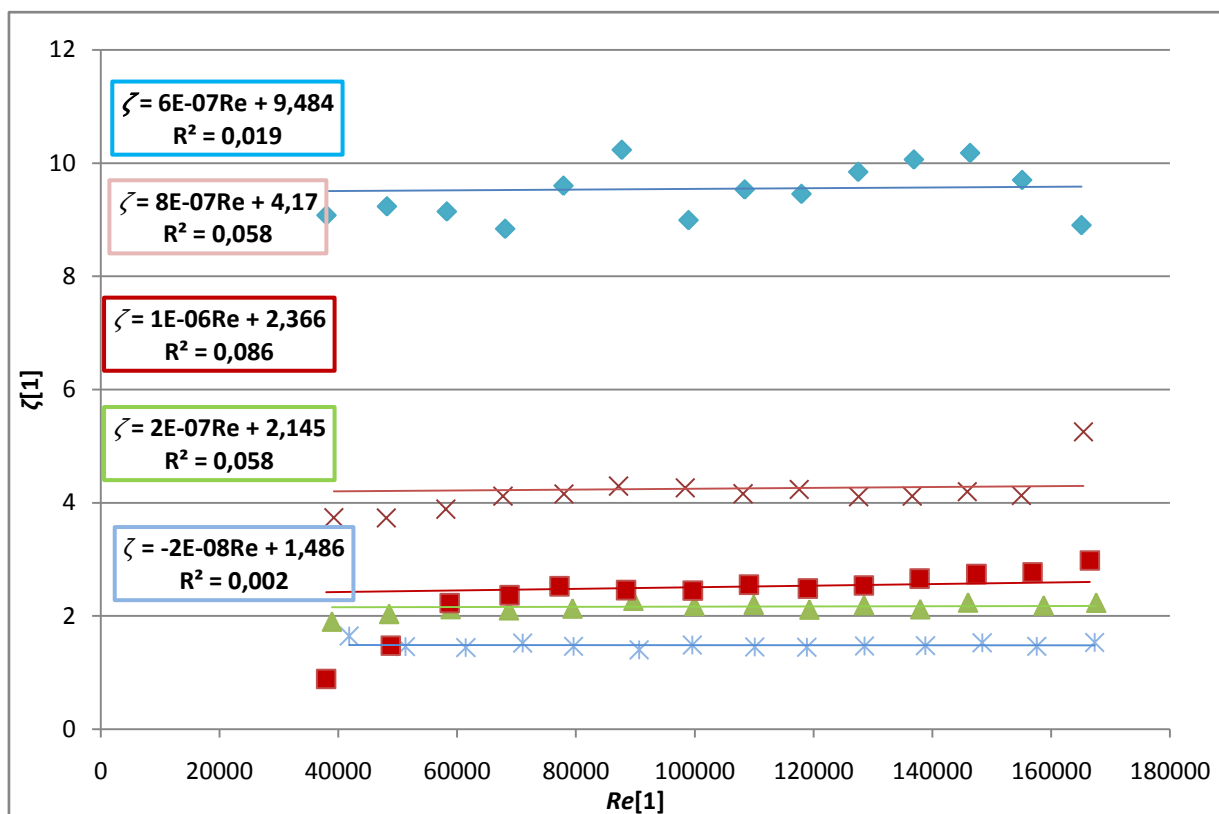
#### 6.4.6 Srovnání jednotlivých měření

Pro lepší přehlednost mezi jednotlivými síty, jsou níže srovnány jejich  $\Delta p - Q$  a  $\zeta - Re$  charakteristiky.



Graf 6.11 – Srovnání závislost tlakových ztrát  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristika) při jednotlivých měřeních

Jak lze vidět v grafu 6.11 nejmenší tlakovou ztrátu dosahovalo prázdné těleso filtru. Nižších tlakových ztrát dosahovaly síta bez opěrné klece, která tvoří další přídavný odpor uvnitř armatury. Síta s opěrnou klecí pak dosahovaly větších tlakových ztrát v případě hrubšího síta pak velmi výrazně. Důvodem vyšší tlakové ztráty hrubšího síta (4) může být například větší ovlivnění směru proudění než v případě jemného síta, důvod vyšší tlakové ztráty je dále nastíněn v kapitole 8.



Graf 6.12 – Srovnání ztrátových součinitelů

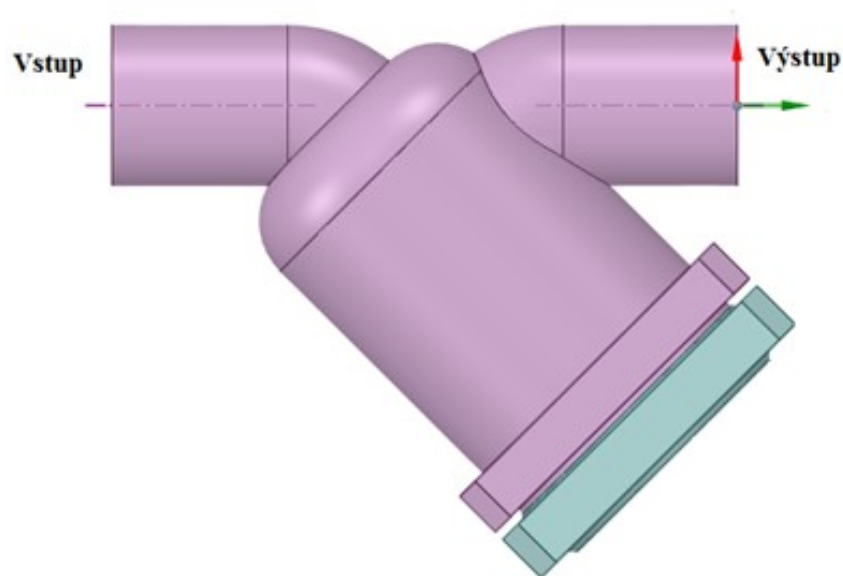
Graf 6.12 ukazuje, jakým způsobem se liší ztrátový součinitel při použití jednotlivých sít. Podobně jako u tlakové ztráty, nejmenší ztrátový součinitel vykazovala prázdná armatura. U sít docházelo spíše k nahodilým změnám tohoto součinitele s rostoucím průtokem. Nejvyšší ztrátový součinitel, což již vyplývá z tlakové ztráty, vykazuje hrubší síto s opěrnou klecí, jeví se tedy jako energeticky nejnáročnější.

## 7. Řešení proudění přírubovým filtrem pomocí CFD modelování

Tato kapitola se zabývá úpravou 3D geometrie pro varianty odpovídající měření, tj. prázdné armatury, armatury se sítí bez opěrné klece a sít s opěrnou klecí. Dále je uveden popis vytvoření výpočtové sítě a pojmenování okrajových podmínek. Následně jsou popsány typy okrajových podmínek a jejich výpočet.

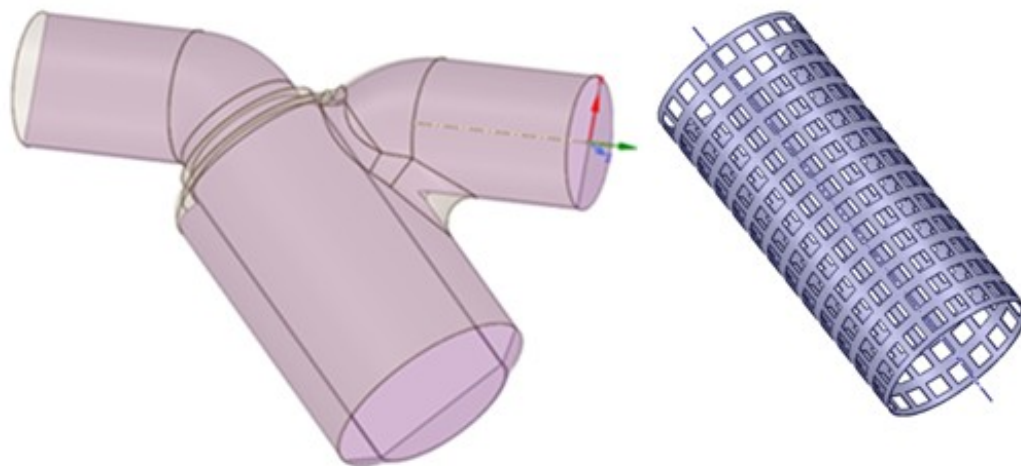
### 7.1 Úprava geometrie

Po dodání armatury k experimentálnímu měření bylo provedeno ověření rozměrů a tvarů 3D geometrie filtru (zaslaná geometrie viz obrázek 7.1).



Obrázek 7.1 – Neupravená geometrie

Pomocí programu PTC Creo Parametric 3.0 bylo vytvořeno na výstupu ze síta zaoblení, které zaslaný model neměl, na skutečné armatuře však bylo. Dále byla pomocí tohoto programu upravená opěrná klec, která oproti zaslanému modelu měla menší otvory. Zaoblení bylo vytvořeno tak, aby co nejvíce odpovídalo skutečnému tvaru. Přesné změření tohoto zaoblení by nejspíše vyžadovalo rozříznutí filtru, 3D geometrii tak není možné uvažovat jako zcela přesnou. Tvar upravené geometrie, viz obrázek 7.2.

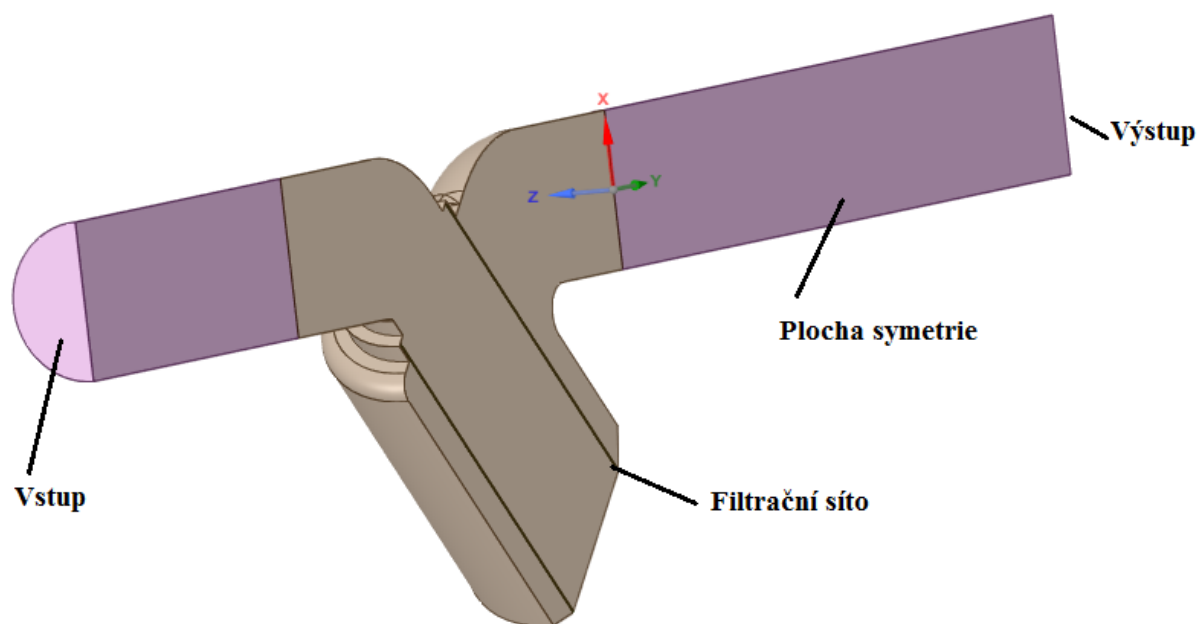


*Obrázek 7.2 – Upravená geometrie – vytvořený zaoblení ve srovnání s původním tvarem, vpravo pak upravená opěrná klec*

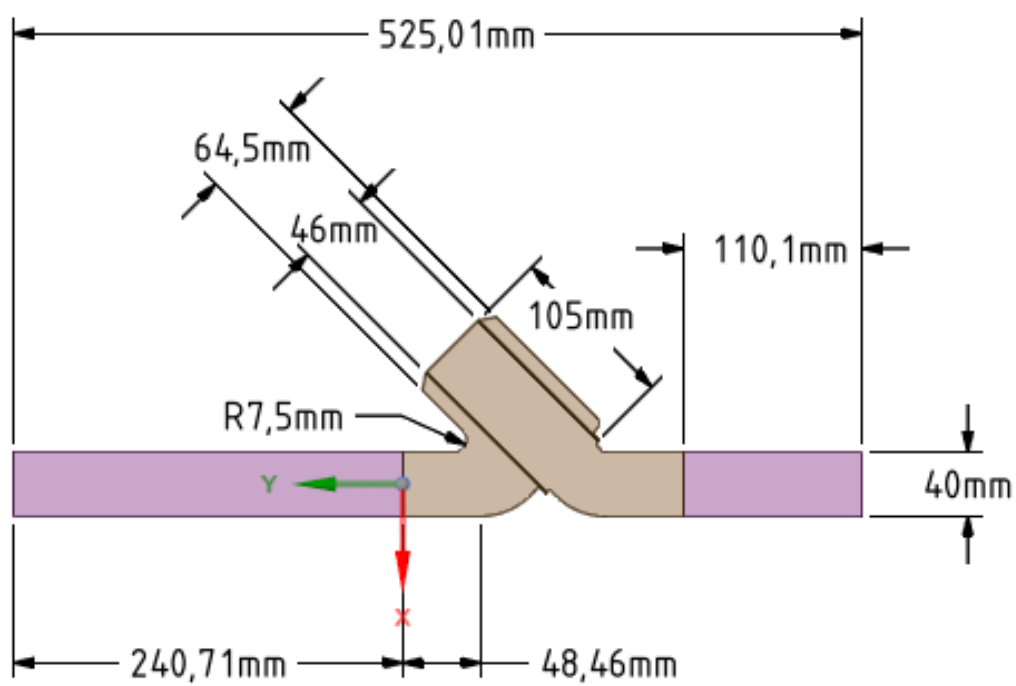
Pomocí v kapitole 4.3 popsaného programu ANSYS *SpaceClaim* jsem prováděl konečné úpravy geometrie přírubového filtru. Jako první jsem importoval zaslanou geometrii do prostředí ANSYS *SpaceClaim*, kde jsem rozložil model na jednotlivé plochy, tak abych mohl geometrii upravit pro numerické řešení.

Provedl jsem tedy odstranění vnějších ploch a další úpravy jako uzavření objemu a prodloužení vstupu a výstupu z filtru, tyto prodloužení byly tvořeny jako samostatné části, aby je bylo možné samostatně síťovat. Nosná klec síta byla modelována fyzicky, se zahrnutím kovových nepropustných částí jako stěny a otvorů jako interior. Byly testovány různé přístupy k definici síta, nejvíce se osvědčil přístup vytvořit síto pomocí plného válečku, kdy bylo nutno objem, ve kterém se váleček v armatuře nachází nejprve oddělit a následně do tohoto prázdného objemu váleček vložit jako samostatný objekt. Následně jsem provedl symetrické rozdělení modelu tak, abych mohl dále ve Fluentu úlohu řešit jako symetrickou a dosáhl tak menšího počtu elementů sítě a rychlejšího výpočtu (konečný tvar modelu a jeho rozměry viz obrázky 7.3 a 7.4).





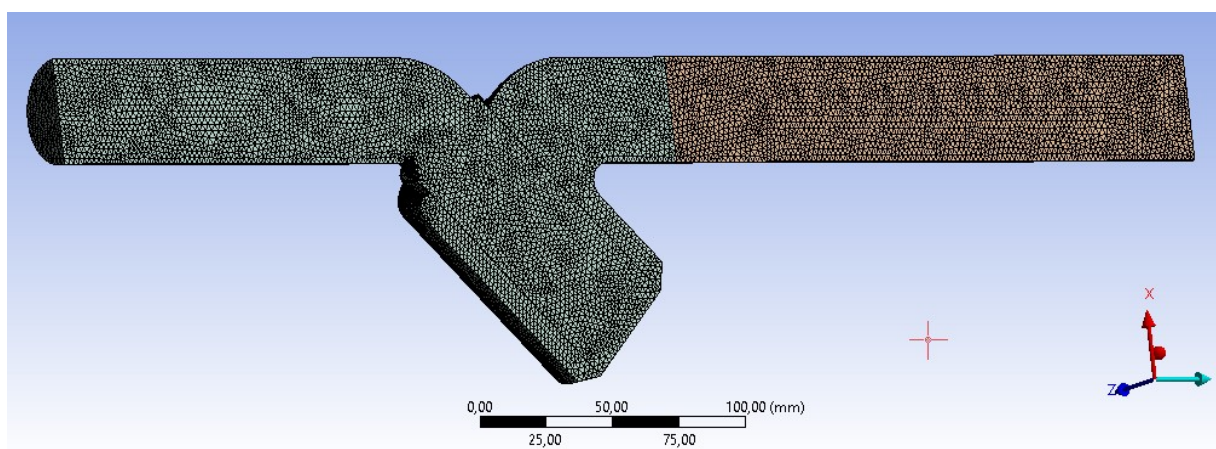
Obrázek 7.3 – Upravená geometrie, symetricky rozdělená



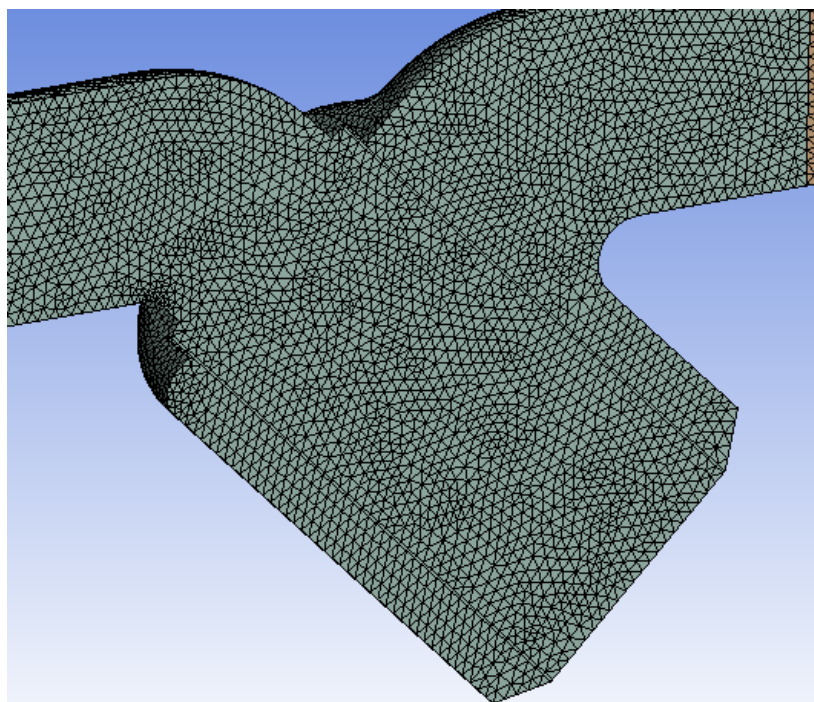
Obrázek 7.4 – Upravená geometrie, hlavní rozměry

## 7.2 Tvorba výpočetní sítě a pojmenování okrajových podmínek

Ve výpočetní síti se po zkoušení různých metod tvaru a velikosti elementu nejvíce osvědčili čtyřstěny (tetrahedrons), kromě síta které bylo tvořeno šestistěny (hexahedrons).



Obrázek 7.5 – Výpočetní síť



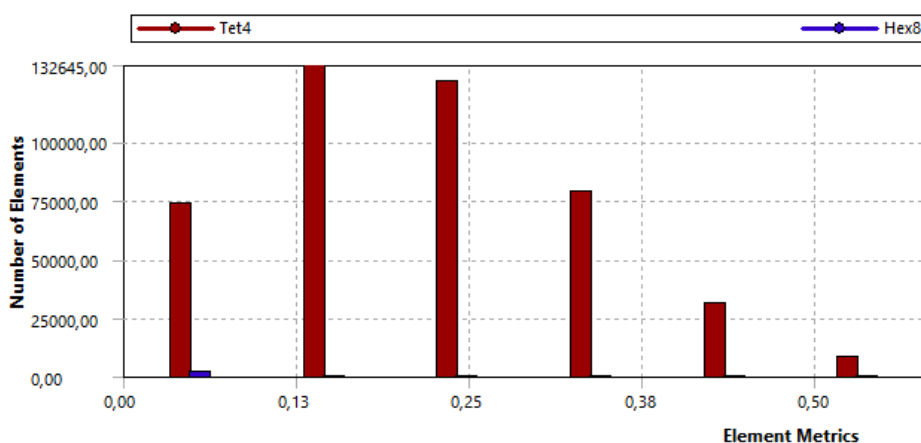
Obrázek 7.6 – Detail výpočetní sítě

Počet elementů	<b>454427</b>
Max face size	2,1 mm
Max tet size	2,1 mm

Tabulka 7.1 – Parametry sítě

## Hodnocení kvality sítě

Pro hodnocení kvality sítě byl použit parametr *skewness*, což je jedno z primárních měřítek kvality sítě. *Skewness* určuje, jak blízko je tvar buňky k ideálnímu. Pro hodnotu 0 se pak jedná o ideální element, 1 potom kompletně „*zdegenerovaný*“ element. Je to tedy poměr rozdílu velikostí ideální buňky a skutečné k ideální velikosti buňky. Pro 3D proudění by se měla jeho hodnota pohybovat v průměru do 0,4.<sup>20</sup>

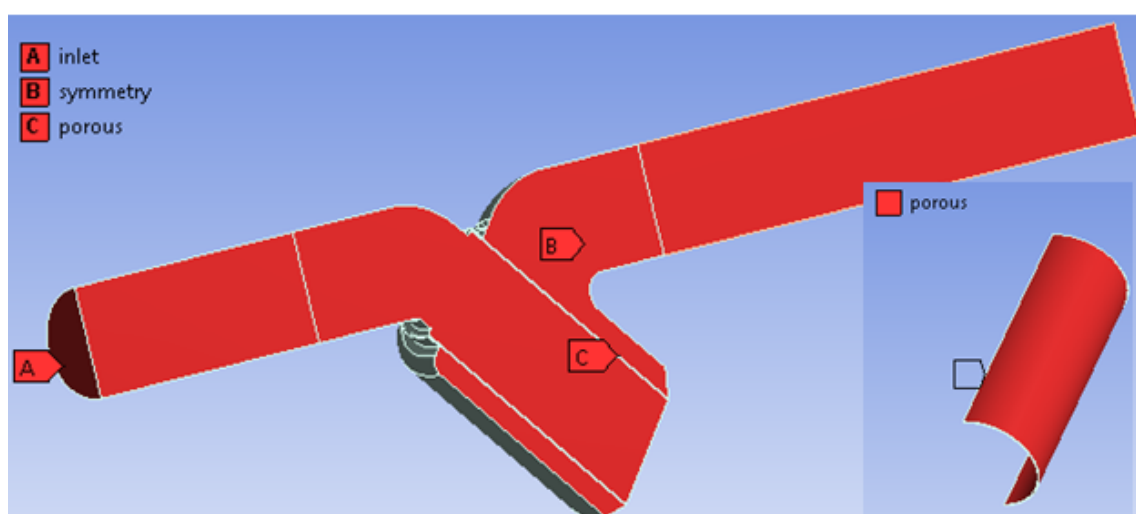


Obrázek 7.7 – *Skewness* vůči počtu elementů

V případě mnou použité sítě dosahoval *Skewness* průměrné hodnoty 0,22. Tato hodnota tedy vypovídá o malém počtu „*zdegenerovaných*“ elementů.

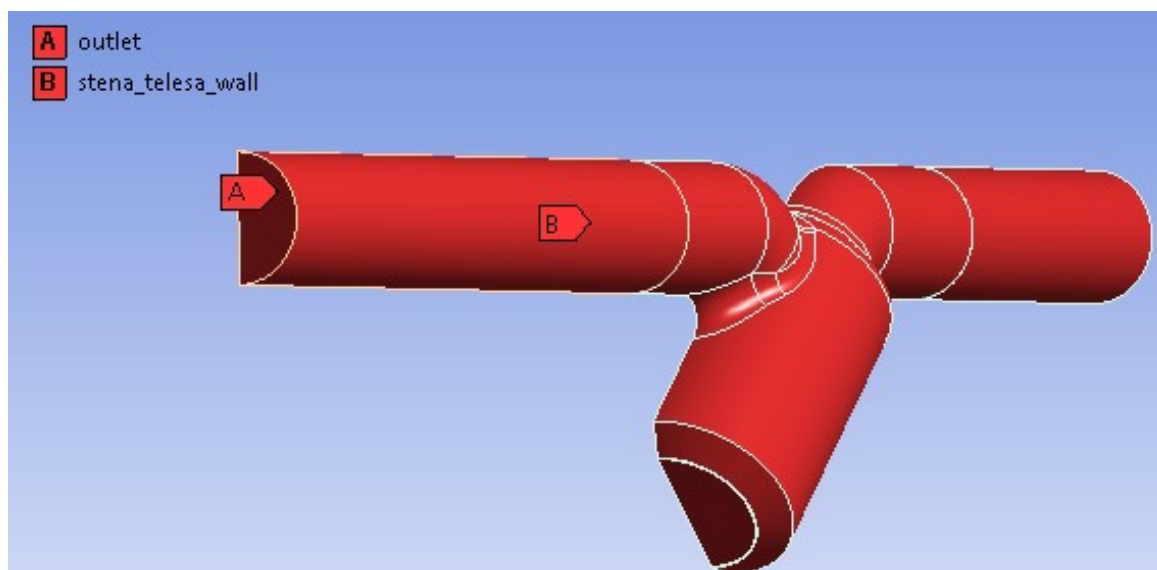
## Pojmenování okrajových podmínek

Pojmenování okrajových podmínek jsem volil tak, aby odpovídalo následné volbě jejich typu (viz obrázek 7.8 a 7.9).



Obrázek 7.8 – *Pojmenování okrajových podmínek*

Na vstupu do armatury tak například bylo voleno pojmenování inlet při předpokladu definování typu okrajové podmínky jako mass flow inlet. Za pomoci těchto pojmenování dojde většinou k automatickému přiřazení typu okrajové podmínky ve Fluentu.



Obrázek 7.9 – Pojmenování okrajových podmínek

### 7.3 Nastavení výpočtového modelu

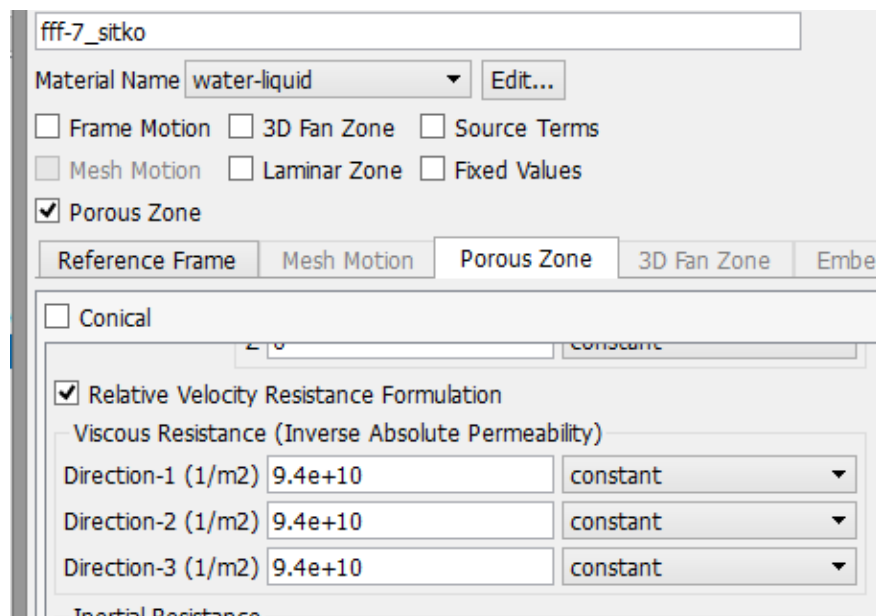
#### 7.3.1 Typ proudícího media (Cell Zone Conditions)

Ve všech oblastech armatury jsem dle oblasti použití filtru volil jako proudící medium vodu (Cell Zone Condition – water liquid). Použité fyzikální vlastnosti viz tabulka 7.2.

Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	998,2
Dynamická viskozita $\mu$ [Pa·s]	0,001003

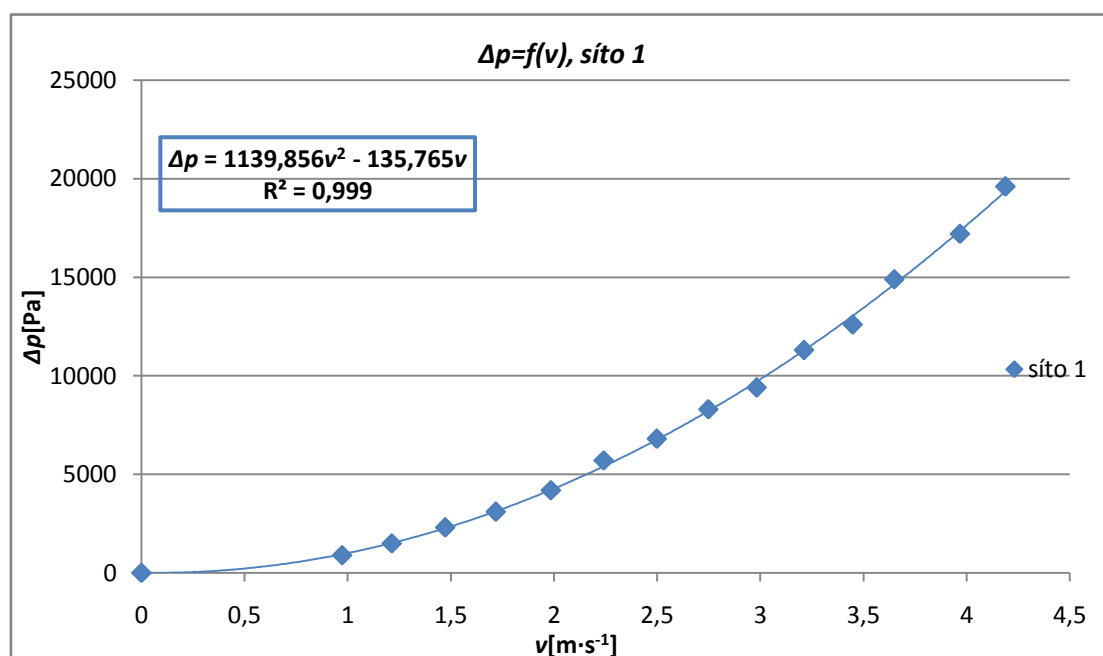
Tabulka 7.2 – Fyzikální vlastnosti vody použité ve Fluentu

V případě síta jsem pak volil možnost zadat jej jako Porous – Zone (porézní oblast). Jako jeho parametry byla zadána obrácená hodnota permeability  $\frac{1}{\alpha_p}$  [m<sup>-2</sup>]. Tato hodnota byla definována pro všechny směry stejná, viz obrázek 7.10.



Obrázek 7.10 – Cell Zone – Porézní oblast

Obrácená hodnota permeability byla zjištěna ze změřených hodnot. Bylo použito více přístupů, jako vytvoření závislosti tlakové ztráty na rychlosti proudění. Pomocí polynomicke spojnice trendu 2. řádu byla zjištěna rovnice regrese ( $\Delta p = A_2 \cdot v^2 + A_1 \cdot v$ ), z koeficientů  $A_1$  pak byla vztahem 7.1 získána obrácená hodnota permeability  $\frac{1}{\alpha_p}$ .



Graf 7.1 – Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění, síto 1

Pro  $\frac{1}{\alpha_P}$  pak platí:

$$\frac{1}{\alpha_P} = \frac{A_1}{\mu \cdot \Delta m} \quad (7.1)$$

kde:

- $\mu$  je dynamická viskozita vody [Pa·s]
- $\Delta m$  je tloušťka porézní vrstvy [m]

V případě síta 4 je po dosazení dynamické viskozity vody  $\mu = 1,003 \cdot 10^{-3}$  Pa·s a tloušťky vrstvy  $\Delta m = 0,001$  m

$$\frac{1}{\alpha_P} = \frac{135,765}{1,003 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001} = 1,36 \cdot 10^8 m^{-2}$$

Dále bylo možno pro výpočet permeability použít vzorec 5.5:

$$\alpha_P = \frac{D_p^2}{150} \cdot \frac{\varepsilon_P^2}{(\varepsilon_P - 1)^2}$$

kde:

V případě síta 1 je po dosazení:

$$\alpha_P = \frac{0,002^2}{150} \cdot \frac{0,64^2}{(0,64 - 1)^2} = 8,42 \cdot 10^{-8} m^2$$

$$\frac{1}{\alpha_P} = \frac{1}{8,42 \cdot 10^{-8}} = 1,19 \cdot 10^7 m^{-2}$$

Jako další z metod jsem použil zjištění permeability ze vzorce 5.6, permeabilita:

$$\alpha_P = \frac{\mu \cdot v}{\left(\frac{\Delta p}{\Delta m} + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2\right)}$$

Tato permeabilita byla počítána pro každý tlakový spád, a následně byla použita její průměrná hodnota, hodnota  $C_2$  byla počítána pomocí vzorce 5.2.

Po dosazení:

$$\alpha_P = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,973}{\left(\frac{900}{0,001} + 1903 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0,973^2\right)} = 5,4 \cdot 10^{-10} m^2$$

Srovnání hodnot permeabilit:

	$\alpha_p$	$1/\alpha_p$
Permeabilita 1	$7,35 \cdot 10^{-9} m^2$	$1,36 \cdot 10^8 m^{-2}$
Permeabilita 2	$8,42 \cdot 10^{-8} m^2$	$1,19 \cdot 10^7 m^{-2}$
Permeabilita 3	$5,4 \cdot 10^{-10} m^2$	$1,85 \cdot 10^9 m^{-2}$

Tabulka 7.3 – Srovnání permeabilit dle jednotlivých přístupů

### 7.3.2 Typy okrajových podmínek (Boundary Conditions)

Při nastavení typů okrajových podmínek byl na vstupu použit hmotnostní průtok. Jeho hodnoty byly voleny dle měření pro snazší srovnání simulace a experimentu. Jedná se tak o hmotnostní průtoky uvedené v tabulce 7.4. Výpočet hmotnostního průtoku byl proveden pomocí vzorce 7.2. Průtok bylo vzhledem k použití podmínky symetrie nutno uvažovat poloviční.

$$Q_M = \frac{Q \cdot \rho}{2} \quad (7.2)$$

Pro snazší orientaci jsou v tabulce 7.4 uvedeny hodnoty rychlosti  $v$  proudění odpovídající použitým průtokům  $Q_M$ .

Hmotnostní průtok $Q_M [kg \cdot s^{-1}]$	Odpovídající rychlost $v [m \cdot s^{-1}]$
0,6	1
1,23	2
1,85	3
2,5	4

Tabulka 7.4 – Varianty hmotnostních průtoků

Na výstupu jsem pak volil pressure outlet, kde jsem jako výstupní tlak uvažoval změřený tlak na výstupu z filtru v Pascalech.

Pro síto byla také použita okrajová podmínka Porous – Jump (tzv. porézní skok, detailní popis viz kapitola 5), k výpočtu jednotlivých parametrů byly použity naměřené hodnoty a parametry jednotlivých filtračních sít. Pro permeabilitu bylo použito stejných přístupů jako v případě Porous – Zone, jako tloušťka  $\Delta m$  byla uvažována tloušťka síta a koeficient  $C_2$  byl počítán dle vztahu 5.2.

Zbylé typy okrajových podmínek odpovídají jejich pojmenování, uvedených na obrázcích 7.8 a 7.9. Stěna tělesa tak byla definována jako *wall*, nepohyblivá bez uvažování přenosu tepla. Osa symetrie pak odpovídala svému pojmenování.

**Pro síta tak budou použity tyto varianty:**

- Boundary Condition jako Porous – Jump (porézní skok)
- Cell Zone Condition jako Porous – Zone (porézní oblast)

**Definování permeability pomocí:**

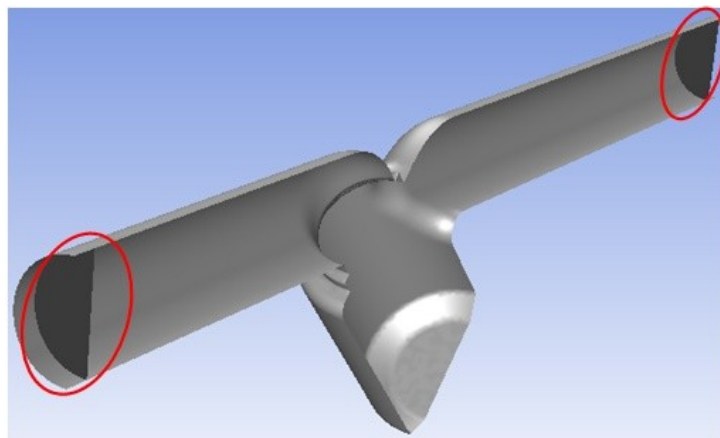
- pomocí polynomu z  $\Delta p - v$  charakteristiky (dále označována jako permeabilita 1)
- pomocí vztahu 5.5, kdy není nutno provést měření (dále označována jako permeabilita 2)
- pomocí vztahu 5.6, vyjádření z tlakové ztráty (dále označována jako permeabilita 3)

### 7.3.3 Nastavení matematického modelu

Dle vyhodnoceného měření a tedy počítaného Reynoldsova čísla jsem volil turbulentní dvourovňový model proudění  $k - \varepsilon$  standardní se standardní funkcí v blízkosti stěny, tento model se při výpočtech různých variant nejvíce osvědčil jako model vedoucí ke konvergentnímu řešení. Obecně se jedná o model používaný nejčastěji v případě průmyslových aplikací.

### 7.4 Vytvoření řezů pro odečet tlaků

Pro přesné srovnání s měřením byly v modelu vytvořeny dvě hladiny příčných řezů, ve vzdálenostech odpovídajících odběrům tlaků při měření.



Obrázek 7.11 – Příčné řezy pro odběr tlaku



## 8. Vyhodnocení jednotlivých variant simulací

Tato kapitola se věnuje vyhodnocením jednotlivých variant výpočtů, jako první proudění prázdnou armaturou. Na základní úloze síta 1 jsou testovány různé přístupy k definování síta a jeho permeability. Varianta, která je tlakovou ztrátou nejbližší k měření, je dále použita pro ostatní varianty sít.

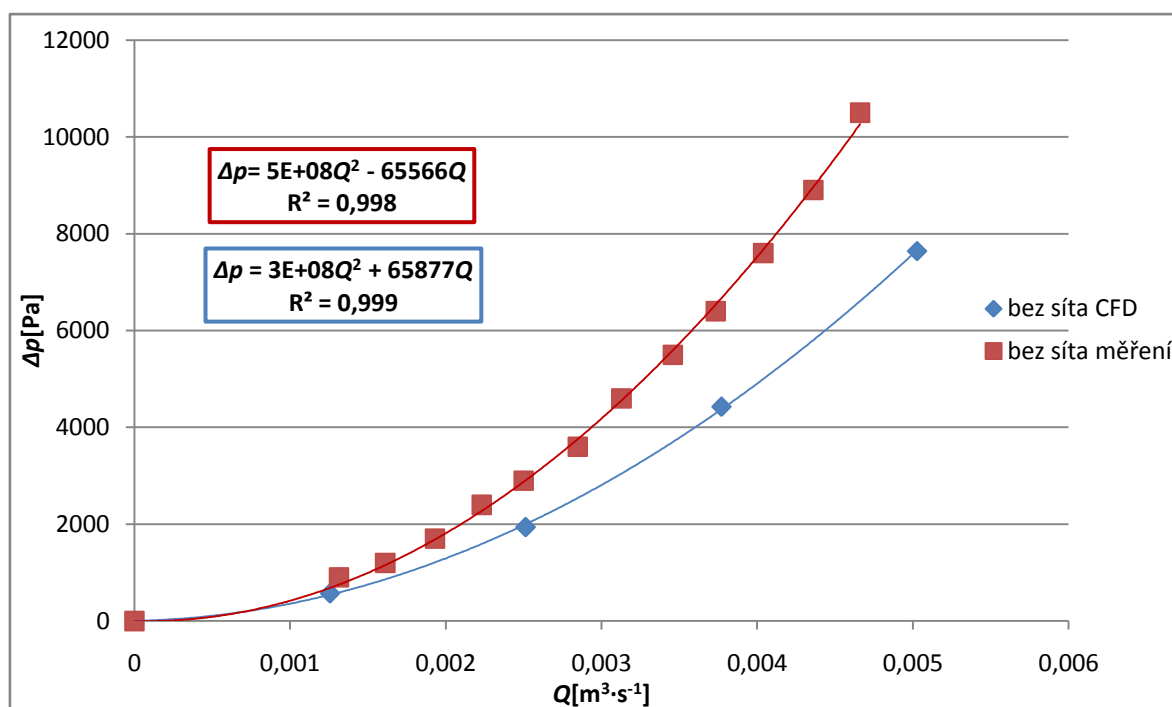
### Kontrola výpočtu

Pro každý výpočet byla kontrolována konvergence řešení, maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích (reziduály) bylo sníženo na  $10^{-4}$ .

Důležitou součástí byla také kontrola modelování v blízkosti stěny, bylo uplatněno řešení pomocí standardní stěnové funkce za podmínky turbulentního proudění. Platí logaritmický předpis pro turbulentní model  $k - \varepsilon$ , jehož platnost je omezena hodnotou bezrozměrného parametru  $y^* > 30 \div 60$ . Tato podmínka byla splněna. Byl také kontrolován průtok na vstupu a výstupu s ohledem na rovnici kontinuity.

### 8.1 Vyhodnocení prázdné armatury

V grafu 8.1 je uvedeno srovnání tlakových ztrát ze simulace a experimentálního měření.



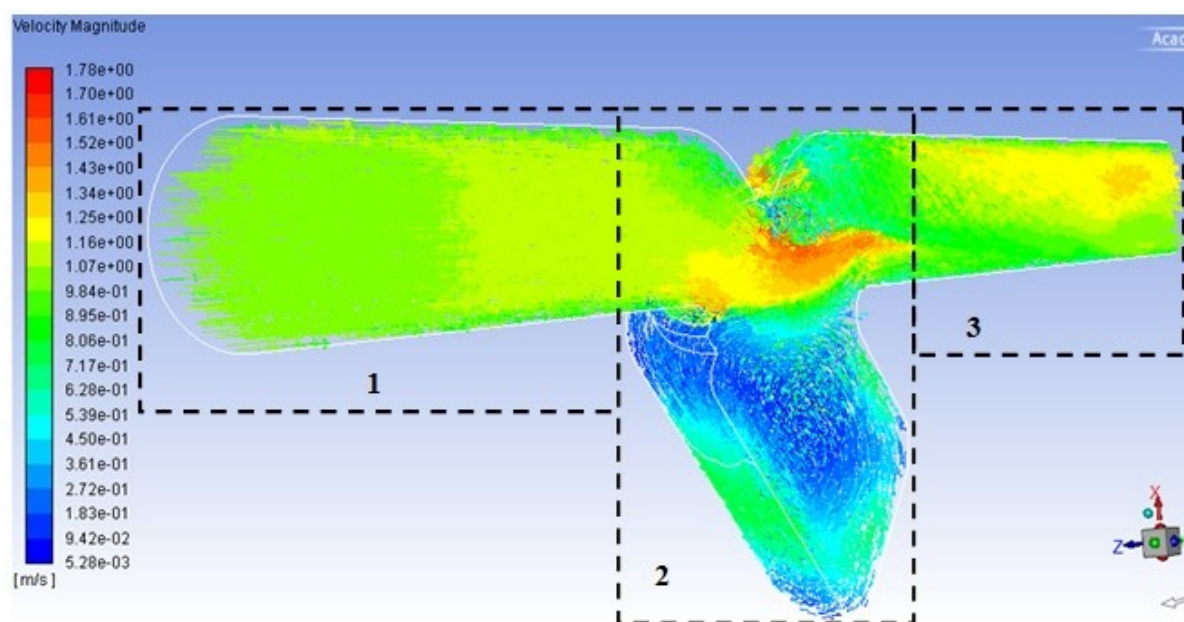
Graf 8.1 –  $\Delta p - Q$  charakteristika prázdné armatury

V grafu 8.1 je při vidět, že při simulaci byla tlaková ztráta nižší, než při experimentu což může být způsobené například geometrií modelu, která může mít mírné odlišnosti od skutečného tělesa filtru.

$Q$	$v$	$p_2$	$p_1$	$\Delta p$	$\Delta p_{\text{změřená}}$
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$
0,001257	1	3570	3002	568	900
0,002513	2	20744	18808	1936	2900
0,00377	3	52651	48228	4423	6400
0,005027	4	80182	72542	7640	10500

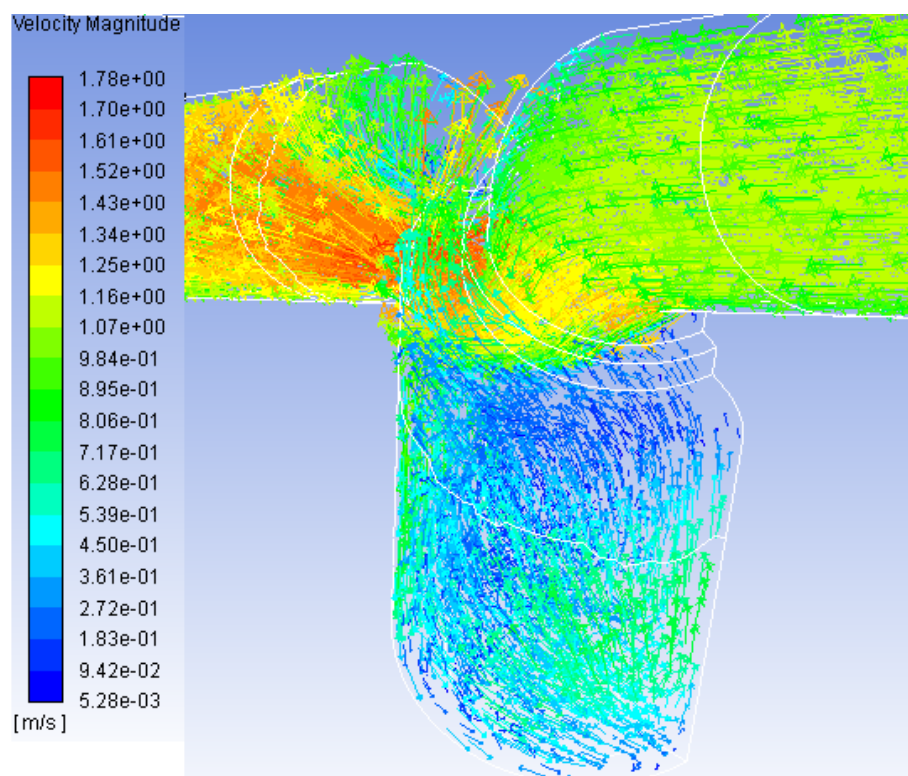
Tabulka 8.1 – Srovnání simulace a experimentu

V tabulce 8.1 je uvedeno číselné srovnání tlaků a jejich diferenci při experimentu a simulaci.



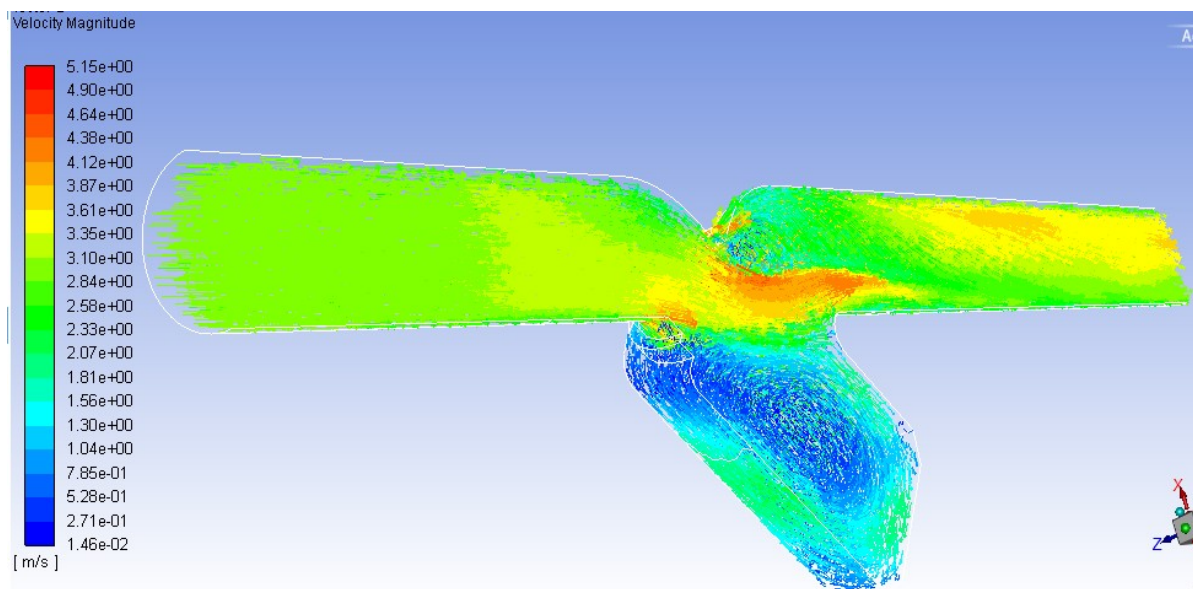
Obrázek 8.1 – Proudění prázdnou armaturou  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vektory rychlosti (1 – Vstup, 2 – Prostor umístění síta, 3 – Výstup)

Na obrázku 8.1 jsou zobrazeny vektory rychlosti (scale 15, skip 30), při hmotnostním průtoku odpovídajícím  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na vektorech je vidět, že k největšímu ovlivnění proudění dochází v oblasti zakřivení na vstupu do prostoru umístění síta, vlivem zúžení průřezu zde dojde k urychlení proudění. V oblasti síta potom dochází k téměř zastavení proudícího media, u stěn se však znovu mírně urychluje a tak znovu způsobuje zavíření na výstupu z armatury, viz obrázek 8.2.

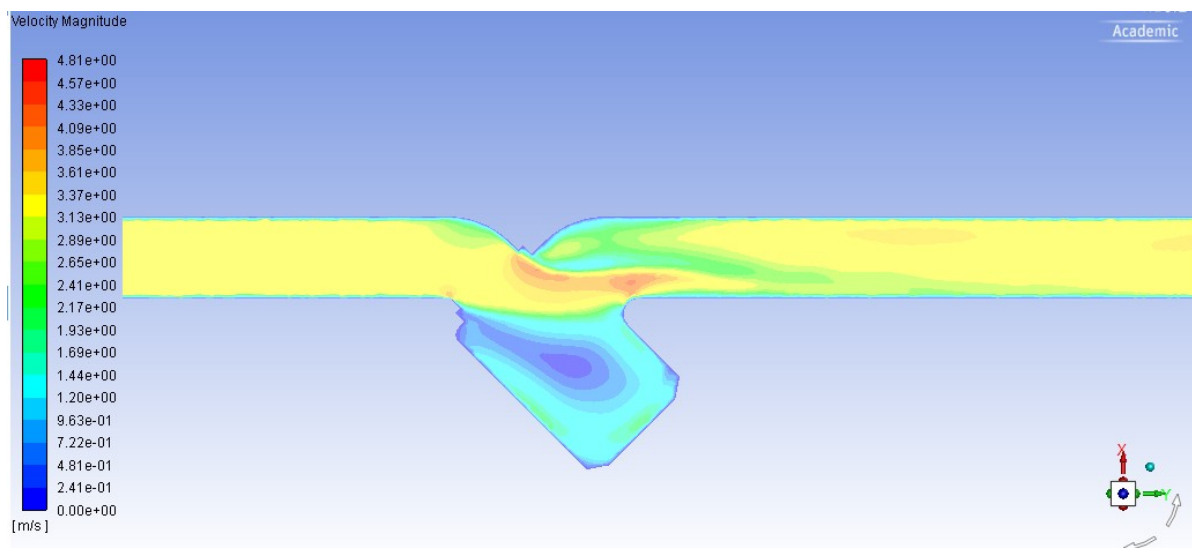


Obrázek 8.2 – Proudění prázdnou armaturou  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vektory rychlosti

Jak ukazuje obrázek 8.3, při vyšších rychlostech proudění dochází k většímu zavírání v oblasti umístění síta, což způsobuje následně i zavírání na výstupu z armatury.

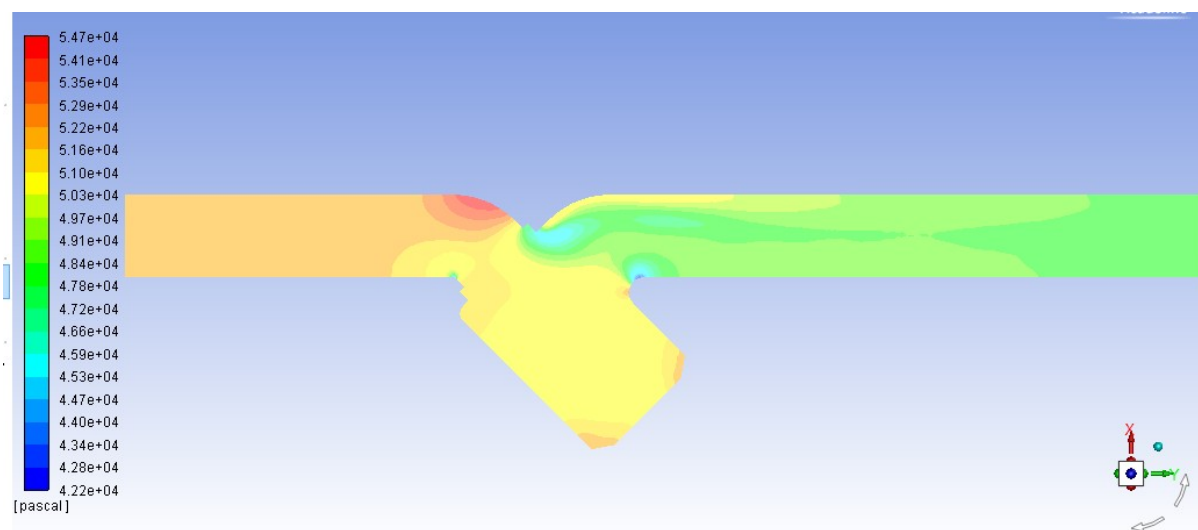


Obrázek 8.3 – Proudění prázdnou armaturou  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vektory rychlosti



Obrázek 8.4 – Kontury rychlosti  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obrázku 8.4 jsou zobrazeny vyplněné kontury rychlosti v ose symetrie, jejich průběh je podobný vektorům rychlosti.



Obrázek 8.5 – Proudění prázdnou armaturou  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  kontury statického tlaku

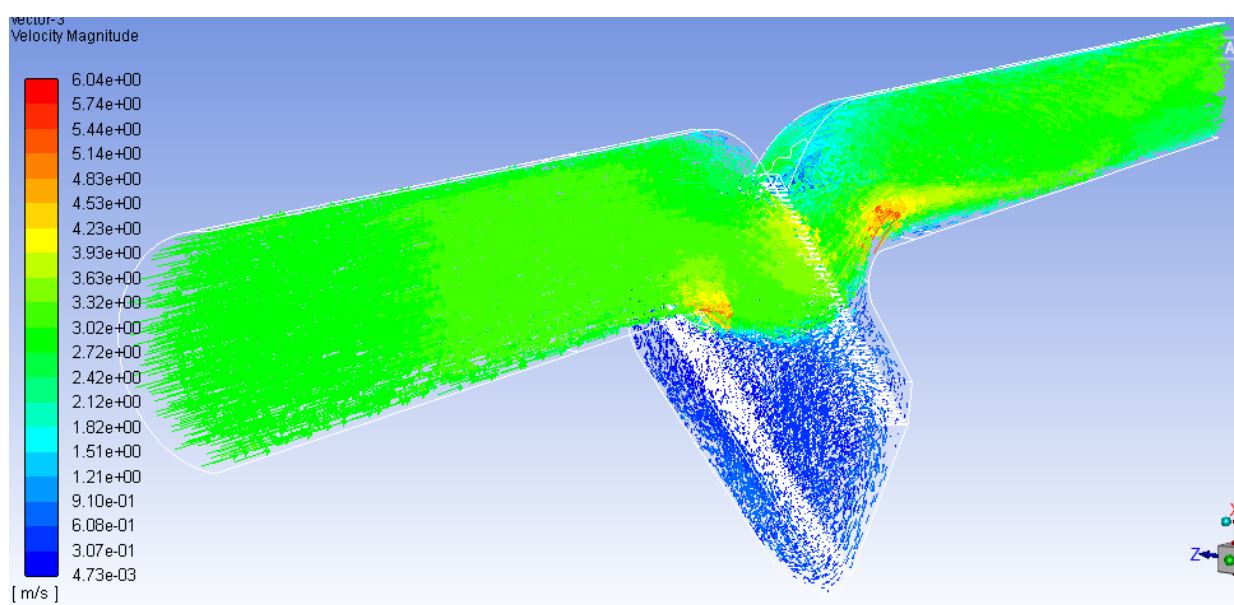
Z obrázku 8.5 je zřetelné, že vlivem zakřivení v oblasti vstupu do síta dochází na vstupu do armatury k nárůstu tlaku, po průchodu oblastí síta se pak tlak postupně zmenšuje. V zaoblení na výstupu ze síta a hraně jeho zajištění pak dochází k poklesu tlaku. Podobného průběhu bylo dosaženo i pro zbylé rychlosti proudění.

## 8.2 Porovnání přístupu řešení síta a permeability

Jak již bylo uvedeno výše, k filtračním sítům lze ve fluentu přistupovat dvěma způsoby a to definovat je pomocí Cell Zone Conditions jako Porous – Zone (porézní oblast) a pak v Boundary Condition jako Porous – Jump (porézní skok). V obou případech je pro jejich definici důležitá hlavně permeabilita. Jsou tak zde vyhodnoceny obě definice síta při všech variantách permeabilit. Tyto úlohy byly testovány na variantě síta 1.

### 8.2.1 Porous – Jump (porézní skok)

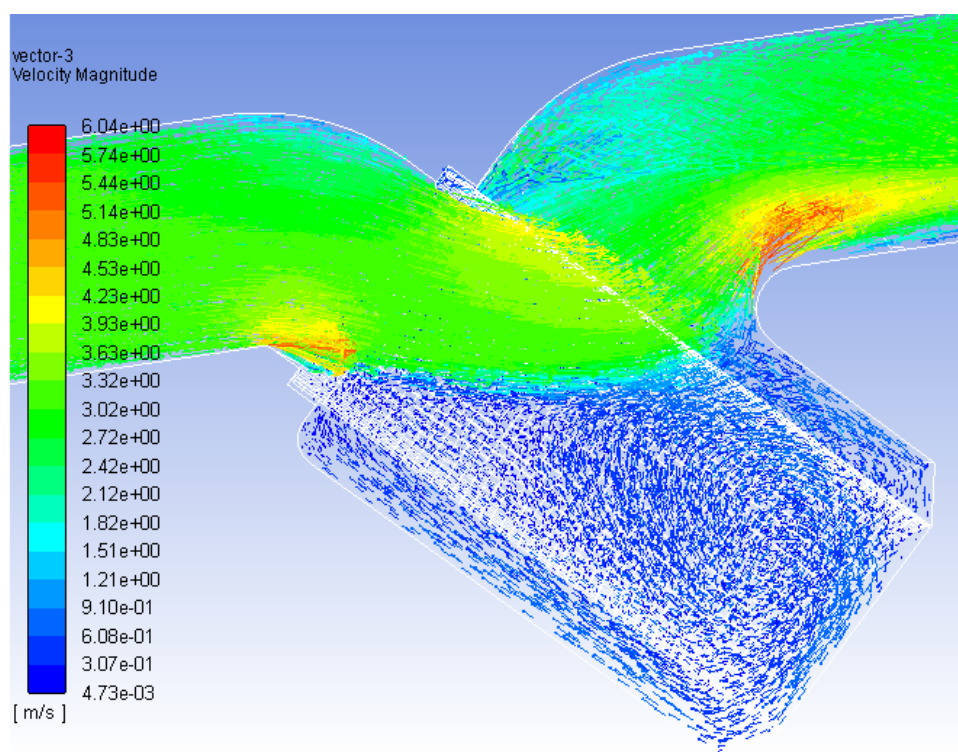
Jako první je uvedeno vyhodnocení pomocí Porous – Jump, jedná se tedy o síto 1 při rychlosti proudění  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na výstupu je pak zadán tlak zjištěný při měření. Na obrázku níže je řešeno proudění při zadání permeability 3.



Obrázek 8.6 – Proudění se sítím 1 při  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vektory rychlosti (scale 15, skip 30)

Ve srovnání s prázdnou armaturou dochází v případě síta zadaného jako Porous – Jump k menšímu zavírání proudění, to je způsobeno zpomalením kapaliny při průtoku sítím. Tento efekt je lépe zachycen na obrázku 8.7.





Obrázek 8.7 – Detail prostupu kapaliny sítím

### Tlaková ztráta:

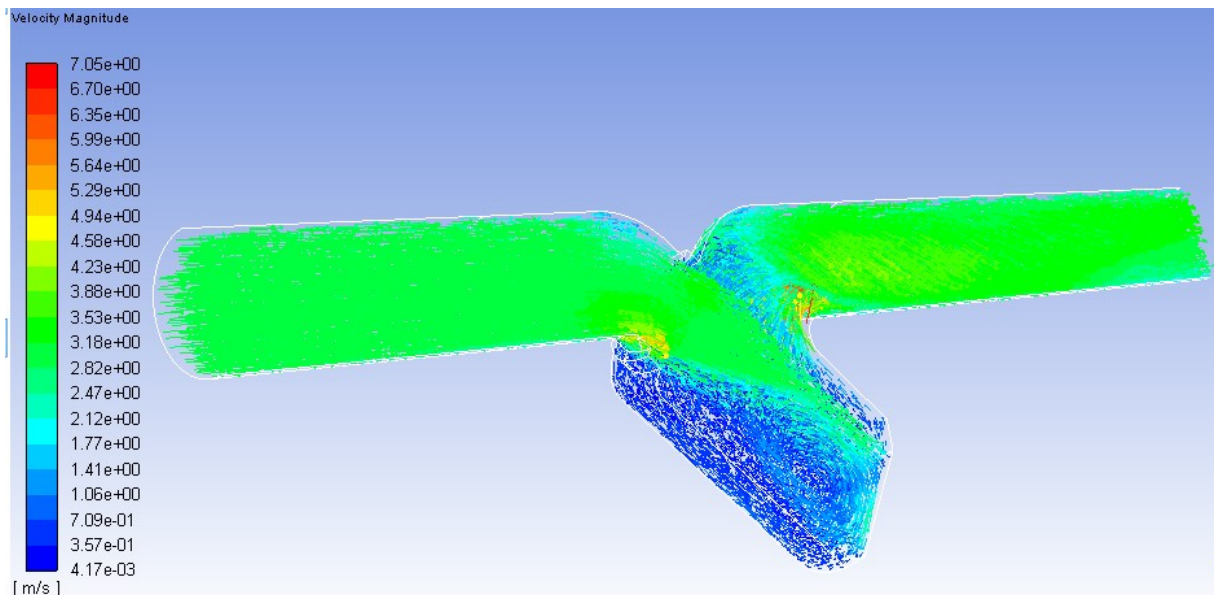
V tabulce 8.2 jsou uvedeny tlakové difference pro jednotlivé permeability, tlaková ztráta se nejvíce přiblížila naměřené při použití permeability 3.

Síto 1 srovnání přístupů Porous – Jump			
	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$
	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Permeabilita 1	52330	47512	4818
Permeabilita 2	52278	47511	4767
Permeabilita 3	53343	47513	5830
Naměřeno	56900	47500	9400

Tabulka 8.2 – Srovnání tlakových diferencí při různých permeabilitách

### 8.2.2 Porous – Zone (porézní oblast)

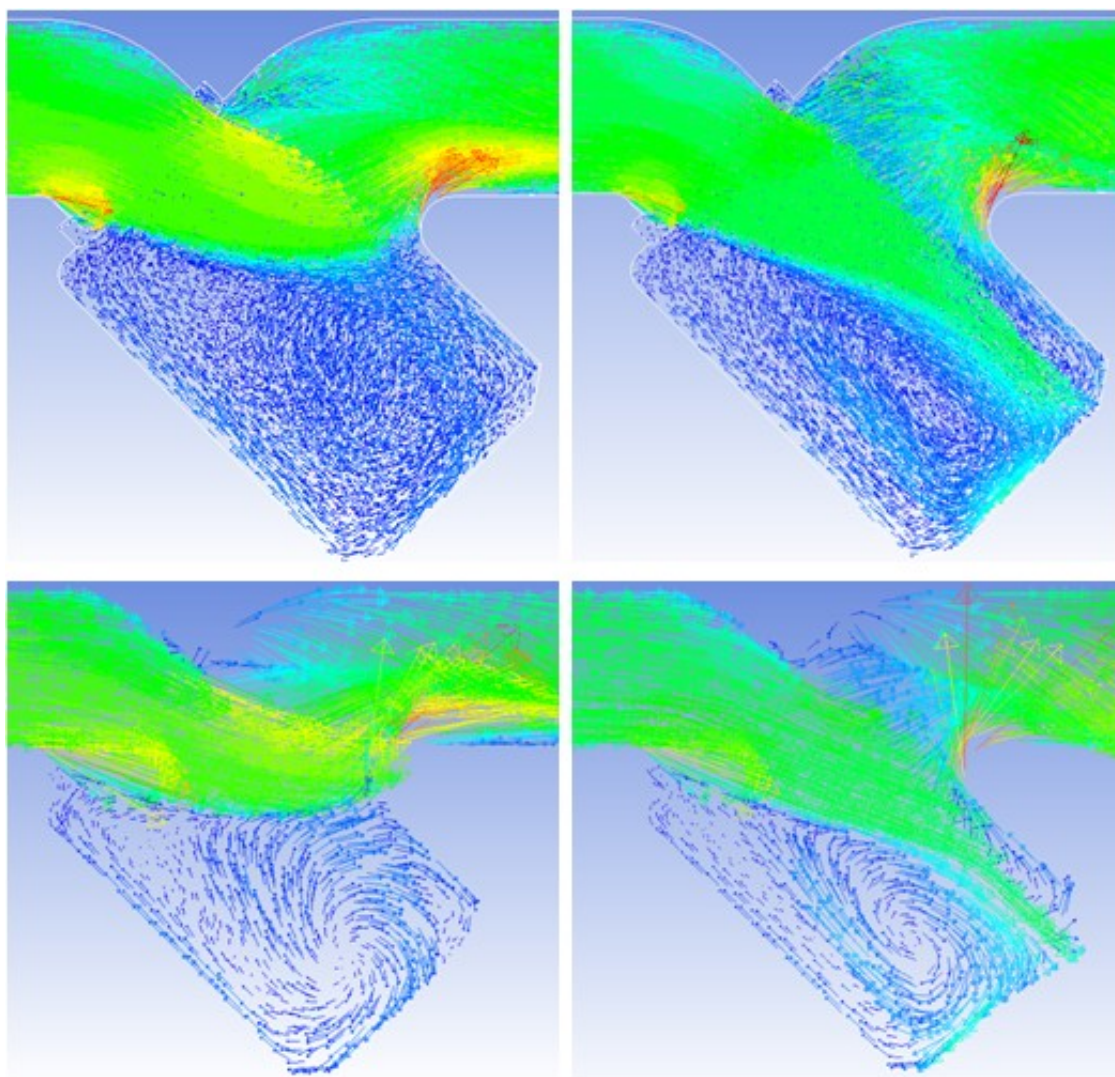
Dalším přístupem je tedy řešení síta pomocí definování v Cell Zone Conditions, a to jako Porous – Zone. Hodnota permeability je zde zadávána v opačně hodnotě tedy  $1/\alpha_p$ . Na obrázku níže je řešeno proudění při zadání permeability 3.



Obrázek 8.8 – Proudění se sítem 1 při  $v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vektory rychlosti (scale 15, skip 30)

*Porous zone*

Ve srovnání s definováním síta pomocí Porous – Jump lze vidět, že v oblasti síta dochází k výraznějšímu zpomalení proudění, a to na větší ploše síta. Ze srovnání lze tedy posuzovat že při definování pomocí Porous – Jump dochází pouze k ovlivnění složek proudění, které do síta vstupují normálově. Vzhledem k tomu, že síto je oproti vstupu nakloněno, není vhodné použít definování pomocí Porous – Jump, jako vhodnější se jeví Porous – Zone. Pro lepší srovnání je uveden obrázek 8.9, odstupňování barev viz obrázky 8.8 a 8.6.



Obrázek 8.9 – Srovnání Porous – Zone (vpravo) a Porous – Jump (vlevo), dole pak vyobrazení v ose symetrie

V tabulce 8.3 je uvedeno srovnání pro různé permeability jako v předchozím případě.

Síto 1 srovnání přístupů Porous – Zone			
	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$
	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Permeabilita 1	51785	47526	4259
Permeabilita 2	52130	47517	4613
Permeabilita 3	56891	47514	9377
Naměřeno	56900	47500	9400

Tabulka 8.3 – Srovnání tlakových diferencí při různých permeabilitách

Jako v případě Porous – Jump i pro Porous – Zone se nejvíce naměřeným hodnotám přibližuje řešení s permeabilitou 3. V tabulce níže je pak uvedeno srovnání tlakových ztrát z obou simulací, při použití permeability 3, s naměřenou hodnotou pro síto 1 při rychlosti proudění  $v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



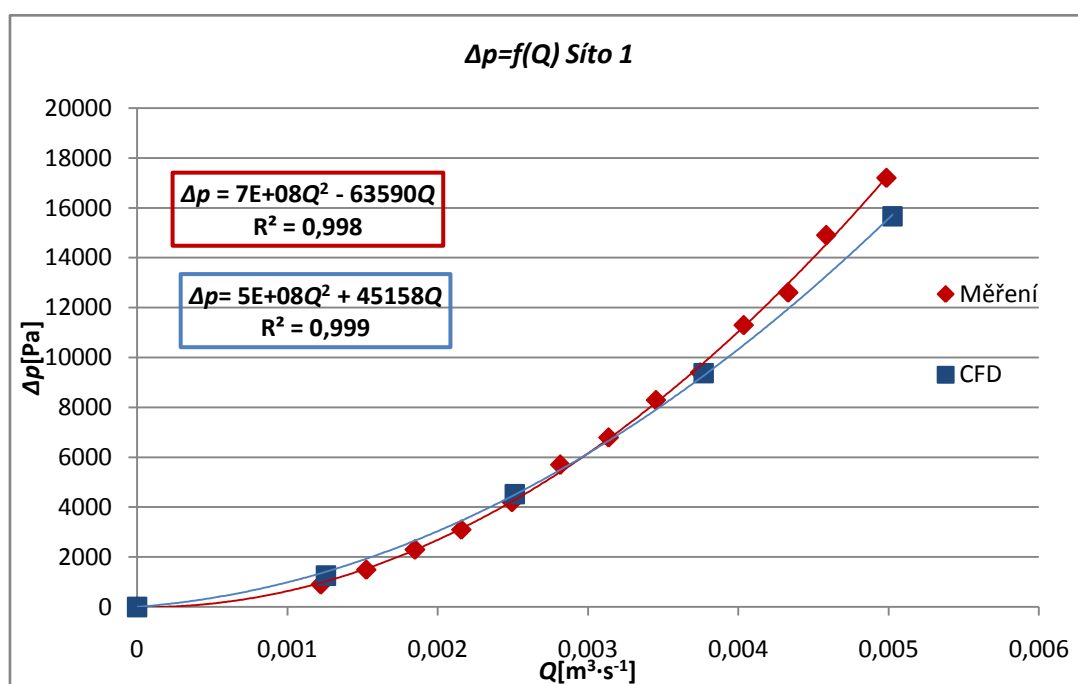
Srovnání Porous Jump a Porous Zone pro perm. 3			
	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$
	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Porous Jump	53343	47513	5830
Porous Zone	56891	47514	9377
Naměřeno	56900	47500	9400

Tabulka 8.4 – Srovnání tlakových diferencí při Porous – Jump a Porous – Zone

Z hodnot uvedených v tabulce 8.4 lze vidět, že v případě definice síta jako Porous – Zone dochází k lepší shodě s měřením, než v případě Porous – Jump. Na základě jak tohoto srovnání, tak grafických řešení budou další síta řešena jako Porous – Zone s použitím permeability 3.

### 8.3 Vyhodnocení síta 1

Za použití metody, která byla vybrána na základě srovnání v předchozí kapitole, bylo síto 1 řešeno pro zvyšující se průtoky (rychlosti proudění). Vyhodnocena je hlavně tlaková ztráta a srovnaná s měřením.



Graf 8.2 – Srovnání tlakové ztráty změřené se simulací, síto 1

V grafu 8.2 je uvedeno srovnání průběhu  $\Delta p - Q$  charakteristiky zjištěné ze simulace a měření, jak lze vidět průběh těchto charakteristik je velmi podobný.

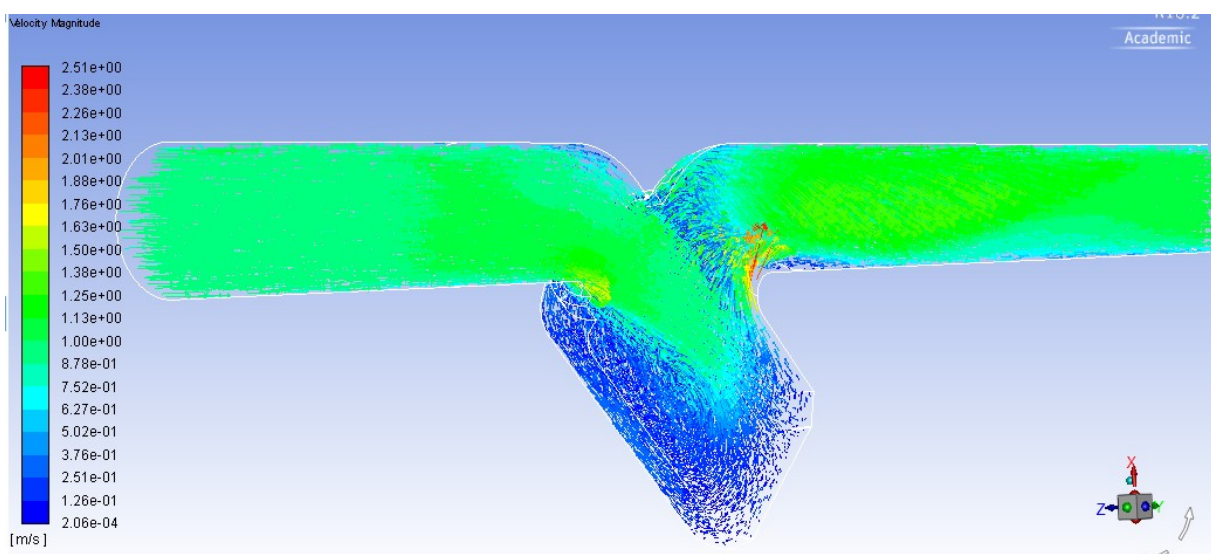
$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$\Delta p_{\text{změřená}}$
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$
0,001257	1	6863	5602	1261	900
0,002513	2	28334	23806	4528	4200
0,00377	3	56890	47514	9376	9400
0,005027	4	102089	86426	15663	17200

Tabulka 8.5 – Srovnání tlakových ztrát

Z hodnot uvedených v tabulce 8.5 lze říci, že při nižších rychlostech je tlaková ztráta v simulaci vyšší než skutečná, jedná se však o malou odchylku. Při vyšších rychlostech proudění je naopak tlaková ztráta ve Fluentu nižší, při rychlosti proudění  $v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je tlaková ztráta téměř stejná jako při měření. Zvolená metoda definování síta a permeability se tak jeví jako správná.

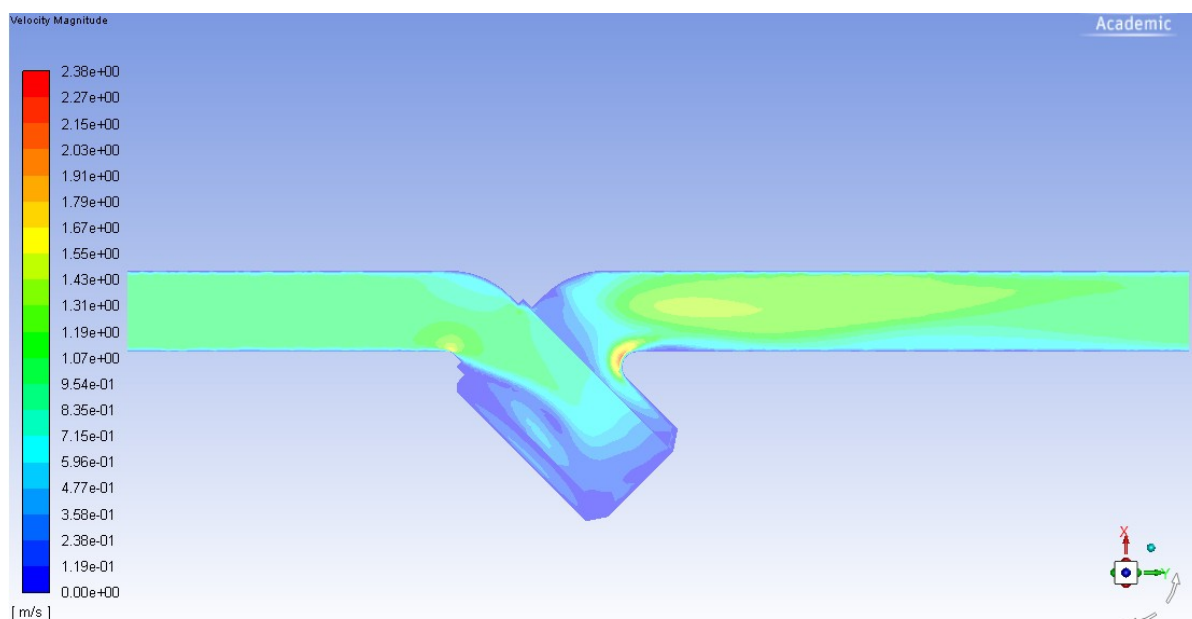
### Grafické výstupy:

Pro vyobrazení proudění v armatuře jsem volil zobrazení vektorů rychlosti, kontur rychlosti a statického tlaku.



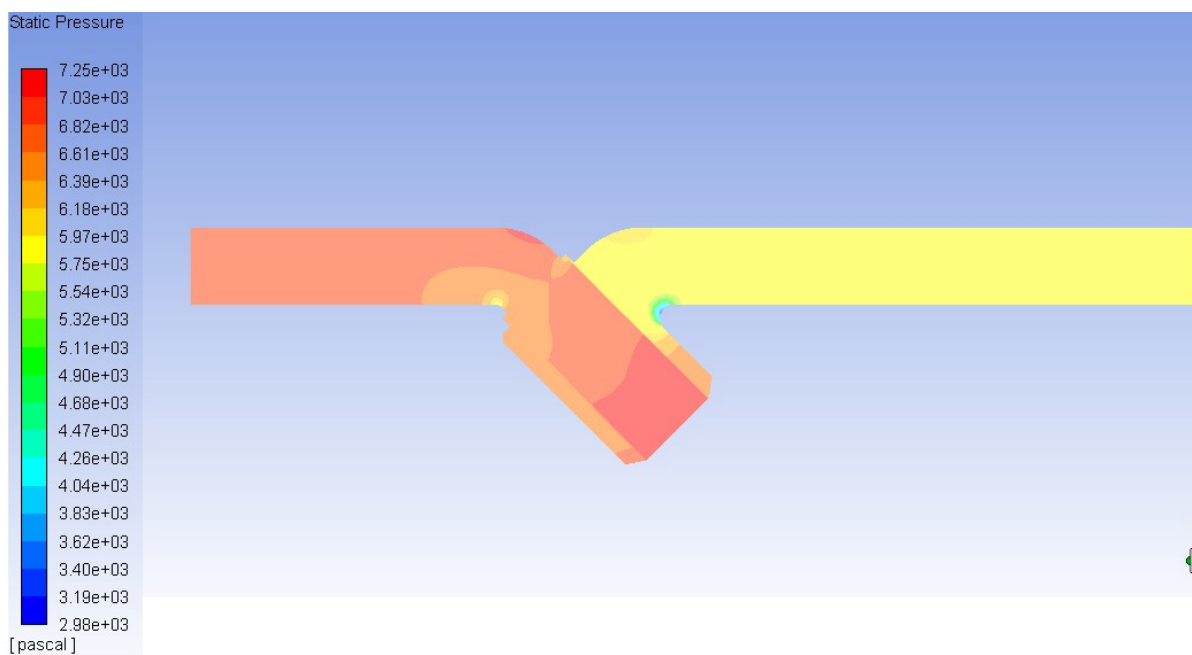
Obrázek 8.10 – Vektory rychlosti při rychlosti proudění  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (scale 15, skip 30)

Na obrázku 8.10 jsou vyobrazeny vektory rychlosti při vstupním hmotnostním průtoku odpovídajícím  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , jak lze vidět vlivem síta dochází ke zpomalení proudění a změně jeho směru dovnitř síta. Část kapaliny se zavíří uvnitř síta a postupně z něj vystupuje po celém jeho obvodu. Nečistoty by se tak pravděpodobně zachytnou postupně na celé ploše.



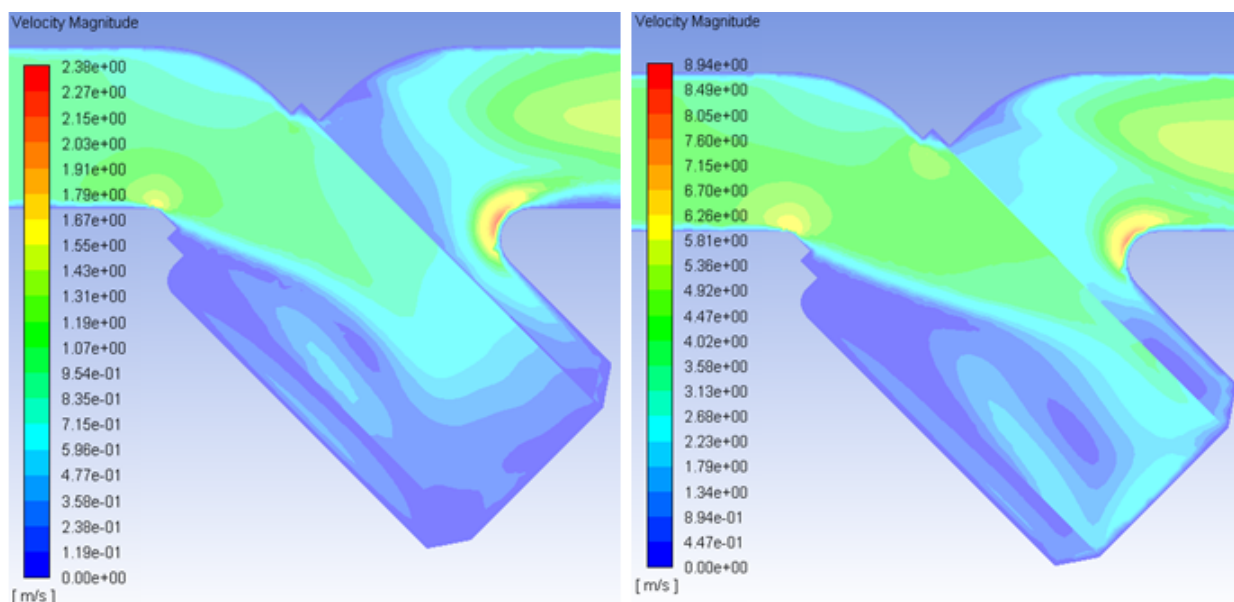
Obrázek 8.11 – Kontury rychlosti při proudění rychlostí  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na konturách rychlosti (obrázek 8.11) je pak vidět, že podobně jako při vyobrazení vektorů, dojde při průtoku sítím k zpomalení proudění. Lépe je zde vidět jak se kapalina směrem ke spodní straně síta skoro zastaví.



Obrázek 8.12 – Kontury statického tlaku pro  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

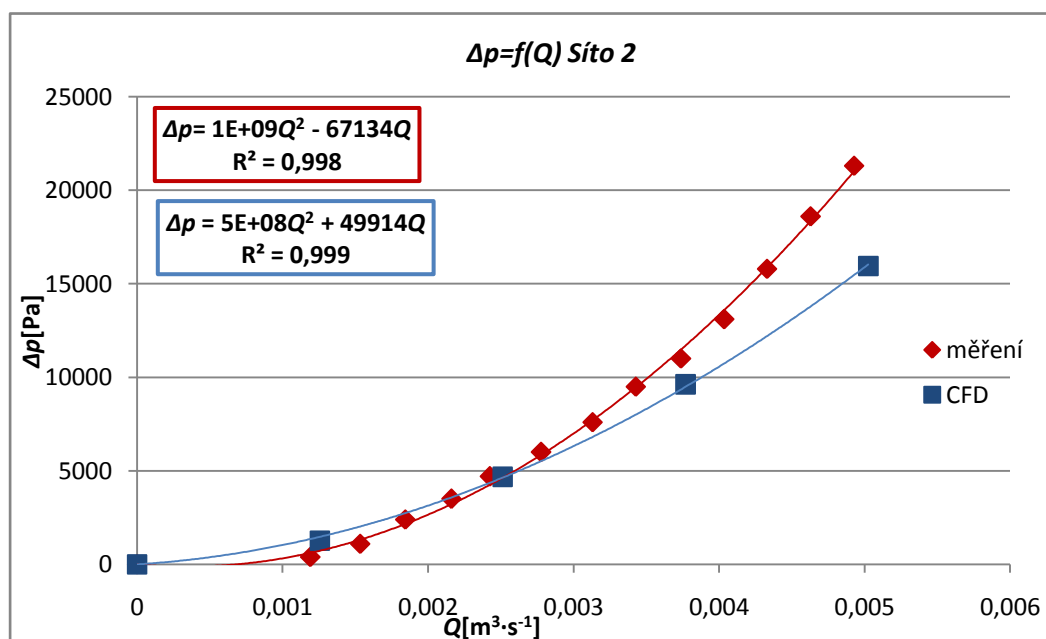
Z kontur statického tlaku je vidět jak se utváří vyšší tlak na vstupu do armatury vlivem odporu, které síto klade. Nejvyšší tlak se pak utváří u víka síta, kde jak již bylo zřetelné z vektorů a kontur rychlosti dochází k velkému zpomalení proudění. V místě zaoblení se pak nachází oblast nízkého tlaku, to je způsobeno urychlením proudění zřetelného již z vektorů a kontur rychlosti.



Obrázek 8.13 – Srovnání kontur rychlosti pro jednotlivé průtoky odpovídající vstupním rychlostem  $v = 1$  a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (vpravo)

Ze srovnání kontur rychlosti jde vidět, jak se kapalina při vyšší rychlosti proudění urychluje v celém sítu, hlavně pak v oblasti víka.

#### 8.4 Vyhodnocení síta 2

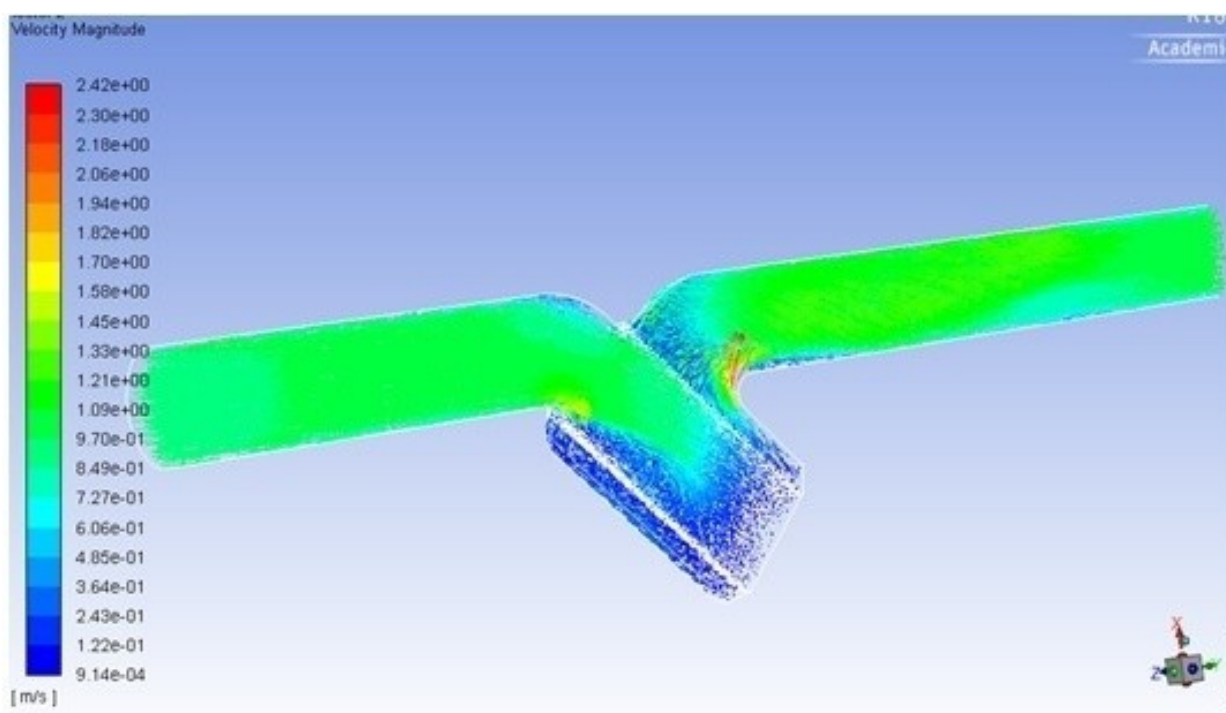


Graf 8.3 – Srovnání tlakové ztráty změřené se simulací, síto 2

$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$\Delta p_{\text{změřená}}$
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$
0,001257	1	7468	6201	1267	400
0,002513	2	28188	23505	4683	4700
0,00377	3	56444	46814	9630	11000
0,005027	4	100678	84725	15953	21300

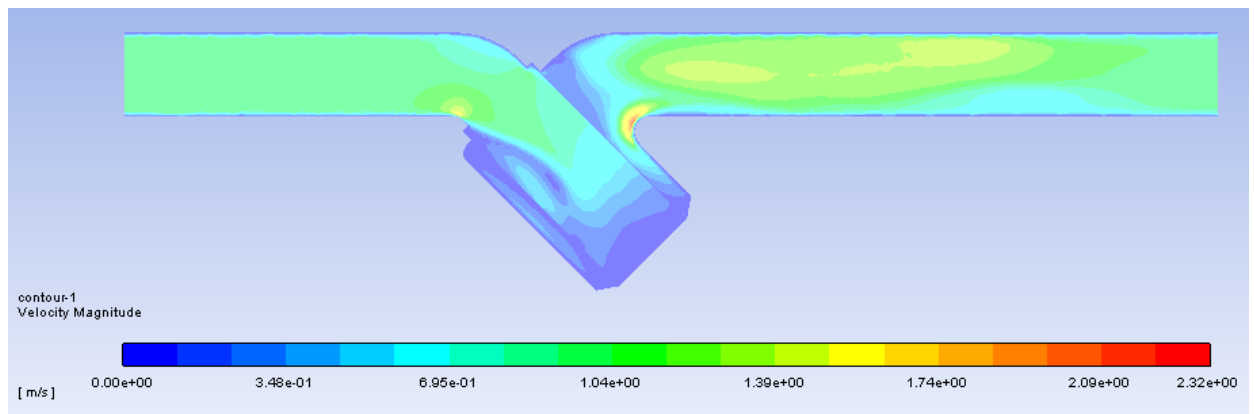
Tabulka 8.6 – Srovnání tlakových ztrát

Ze srovnání  $\Delta p - Q$  charakteristik síta 2 lze vidět podobný průběh, podobně jako u předchozího síta se při vyšších rychlostech tlaková ztráta nezvyšuje tak jako při měření. Při přímém srovnání hodnot tlakové ztráty v tabulce 8.6 je vidět, že největší shody měření se simulací došlo při proudění rychlostí  $v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



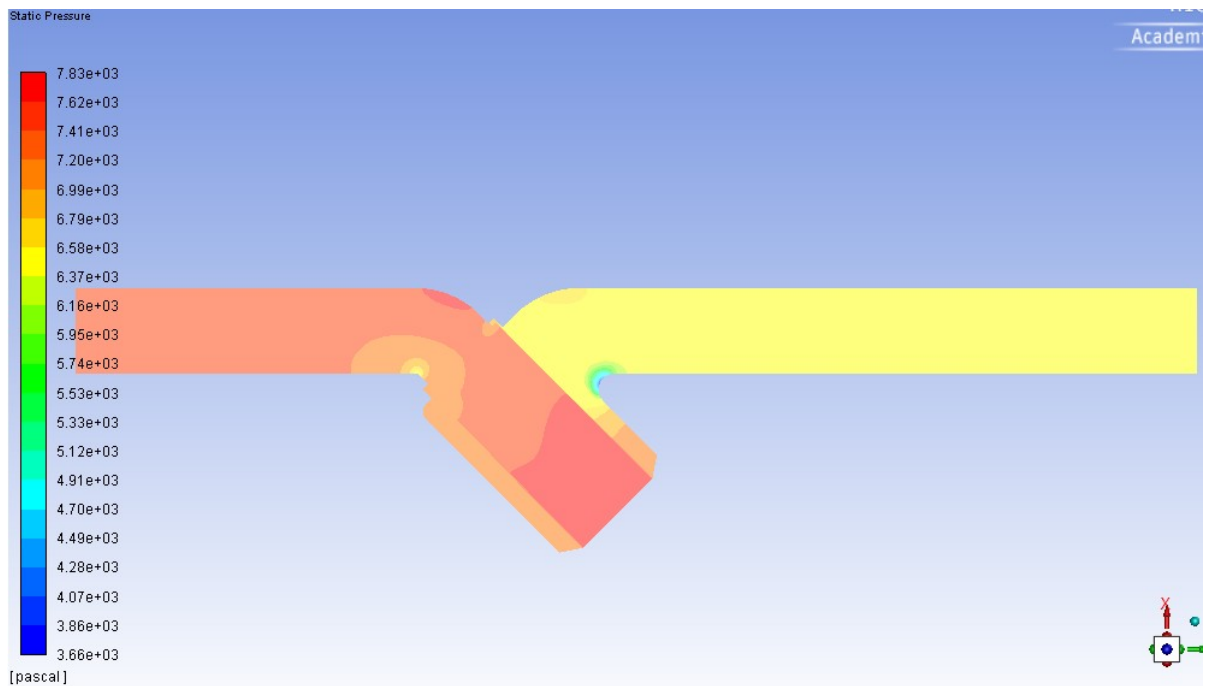
Obrázek 8.14 Vektory rychlosti při rychlosti proudění  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (scale 15, skip 30)

Při srovnání vektorů rychlosti síta 1 a 2 je vidět, že jsou průběhy velmi podobné, v případě síta je maximální dosažená rychlost menší, což je způsobeno větším odporem tohoto síta. Proudění je zároveň více strháváno dovnitř síta, viz obrázek 8.14.



Obrázek 8.15 – Kontury rychlosti při  $v = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

V případě kontur rychlostí je vidět, jak se u víka síta kapalina zpomaluje více než v případě síta 1. To je rovněž způsobeno větším odporem, který síto klade. Pro vyšší rychlosti se proudění vyvíjelo podobně jako v případě síta 1.

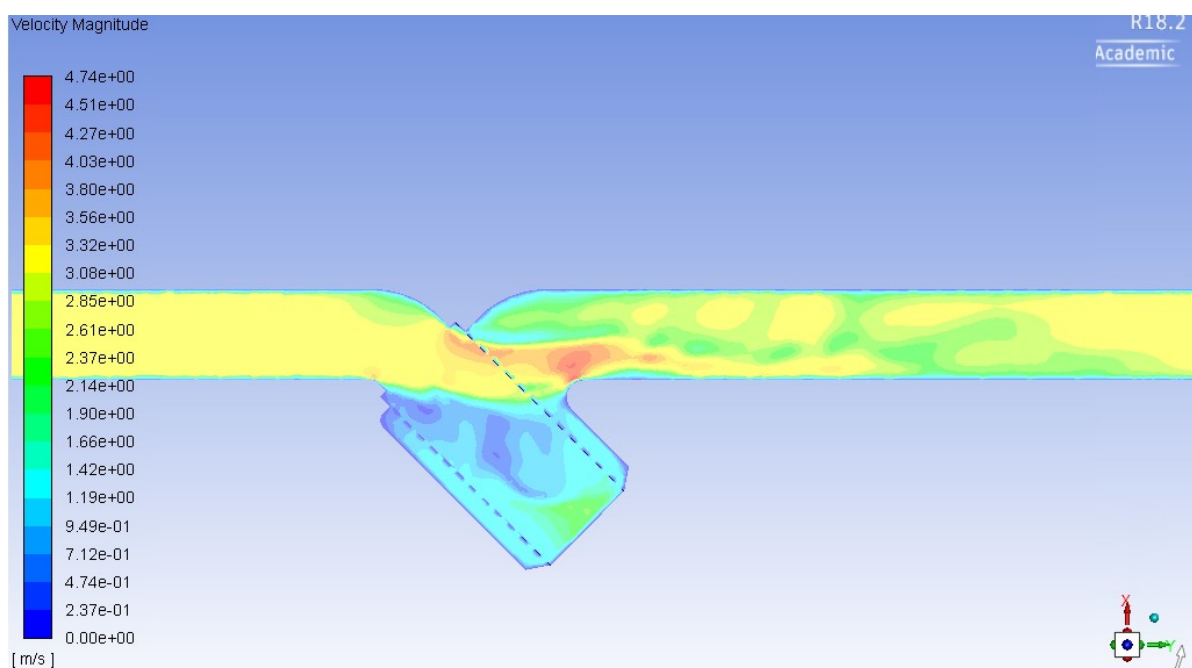


Obrázek 8.16 – Kontury statického tlaku, rychlost proudění  $v = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Kontury statického tlaku odpovídají předchozím vyobrazením rychlosti, tedy že se kapalina procházející sítím zpomalí více než v případě síta 1, a tím také dojde ke zvětšení tlaku na vstupu, také oblast zvýšeného tlaku v sítu má větší rozsah.

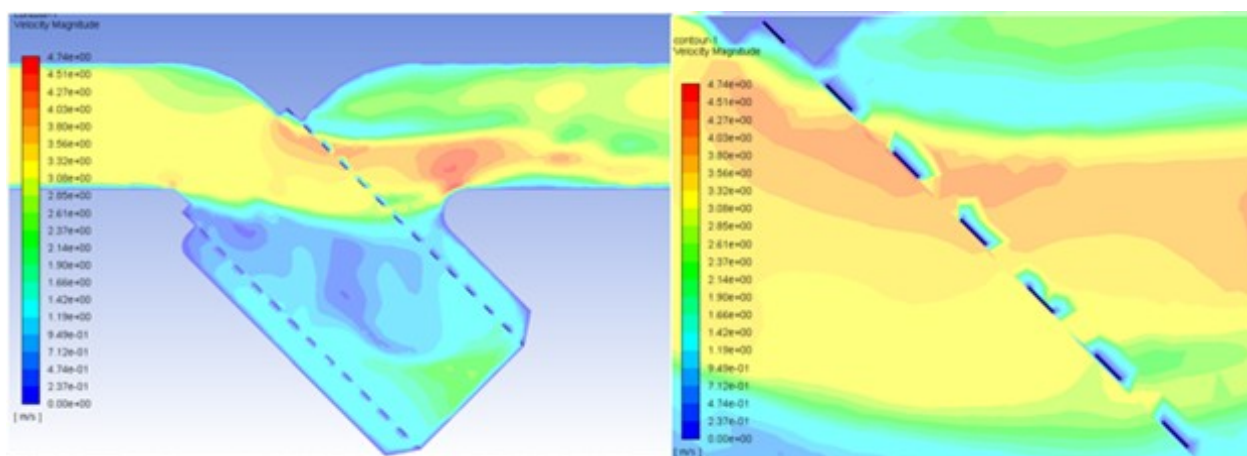
## 8.5 Vyhodnocení síta 3, síto s opěrnou klecí

V případě síta 3 jsem jako první zvolil vyhodnocení armatury pouze s opěrnou klecí, tedy elementu, jenž tvoří další odpor v proudění.



Obrázek 8.17 kontury rychlosti pro armaturu s opěrnou klecí, rychlost proudění  $v = 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obrázku 8.17 je zachyceno jakým způsobem ovlivňuje klec proudění, v případě pokud je bez síta. V reálných úlohách tento případ však nenastává, nebyl proto ani měřen, simulace proběhla pouze pro rychlost  $v = 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jak lze vidět klec způsobuje zaviření v celé navazující oblasti.



Obrázek 8.18 – Detail kontur rychlosti, obtékání klece, rychlost proudění  $v = 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

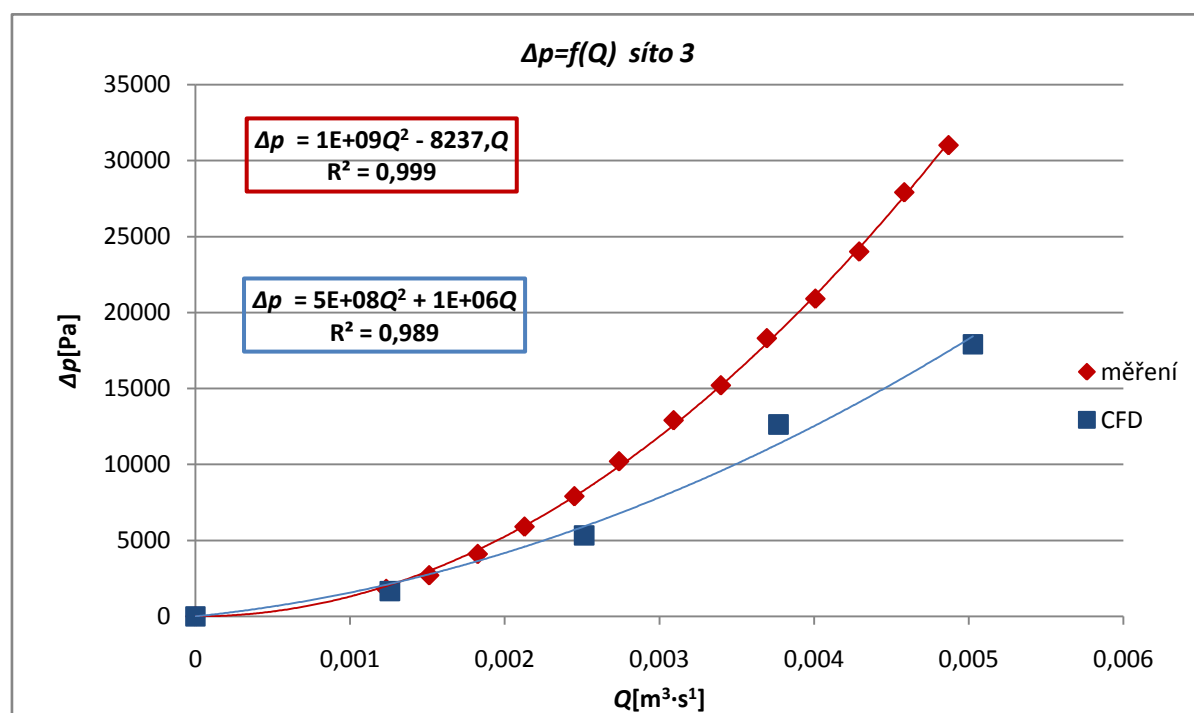


Zavíření je způsobeno obtékáním elementů klece, viz obrázek 8.18. Tlaková ztráta armatury s klecí je pak:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 25559 - 20416 = 5143 \text{ Pa}$$

V případě prázdné armatury simulovaná tlaková ztráta dosahovala hodnoty  $\Delta p = 4423 \text{ Pa}$ . Samotná klec tak zvyšuje tlakovou ztrátu o přibližně 700 Pa.

Dále tedy je již vyhodnoceno síto 3 (s klecí).



Graf 8.4 – Srovnání tlakové ztráty změřené se simulací, síto 3

Z grafu 8.4 lze vidět, že v případě síta s klecí nedochází při simulaci k takové tlakové ztrátě jako při měření, rozdíl se zvyšuje se zvyšujícím se průtokem.

$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$\Delta p_{\text{změřená}}$
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{bar}]$	$[\text{Pa}]$
0,001257	1	7663	6002	1661	1800
0,002513	2	35529	30207	5322	7900
0,00377	3	66470	53843	12627	18300
0,005027	4	101353	83456	17897	31000

Tabulka 8.7 – Srovnání tlakových ztrát

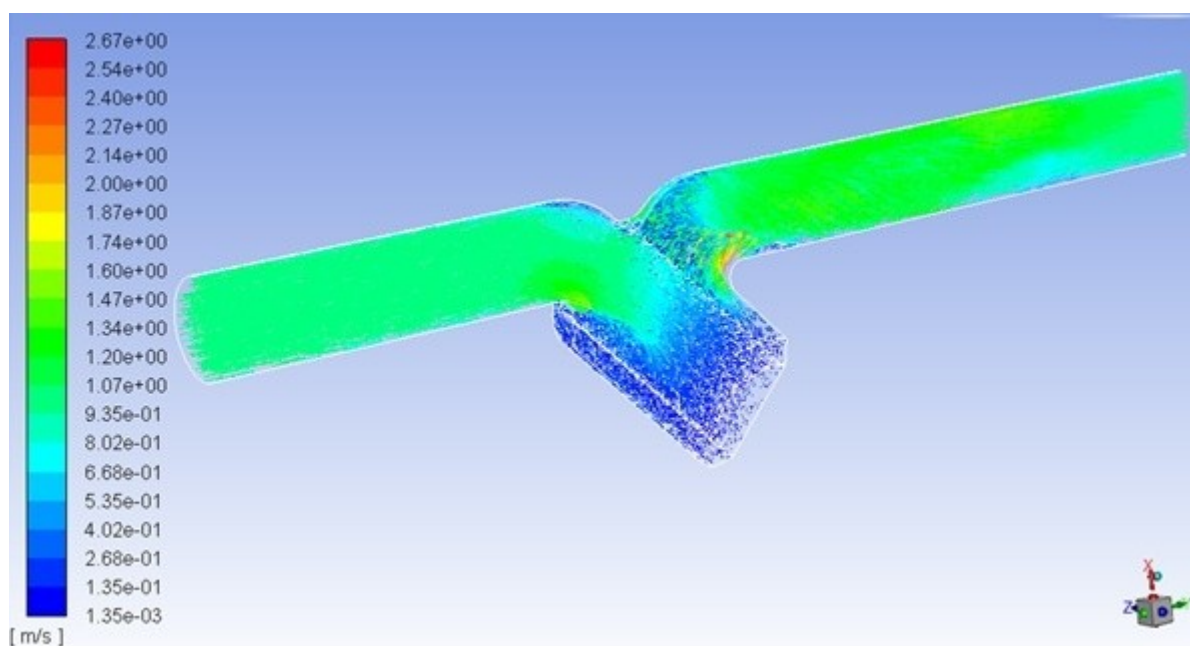


Rozdíl tlakových ztrát je pak ještě více patrný při přímém srovnání v tabulce 8.7, kde lze vidět, že pro nižší rychlosti proudění rozdíl není tak velký, k výrazné odlišnosti dochází u rychlosti proudění  $v = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben tvarem klece, ve skutečnosti se klec v jednom místě překrývá. Tento tvar nelze jednoduchým způsobem zachytit v 3D modelu. Skutečný tvar, viz obrázek 8.19.



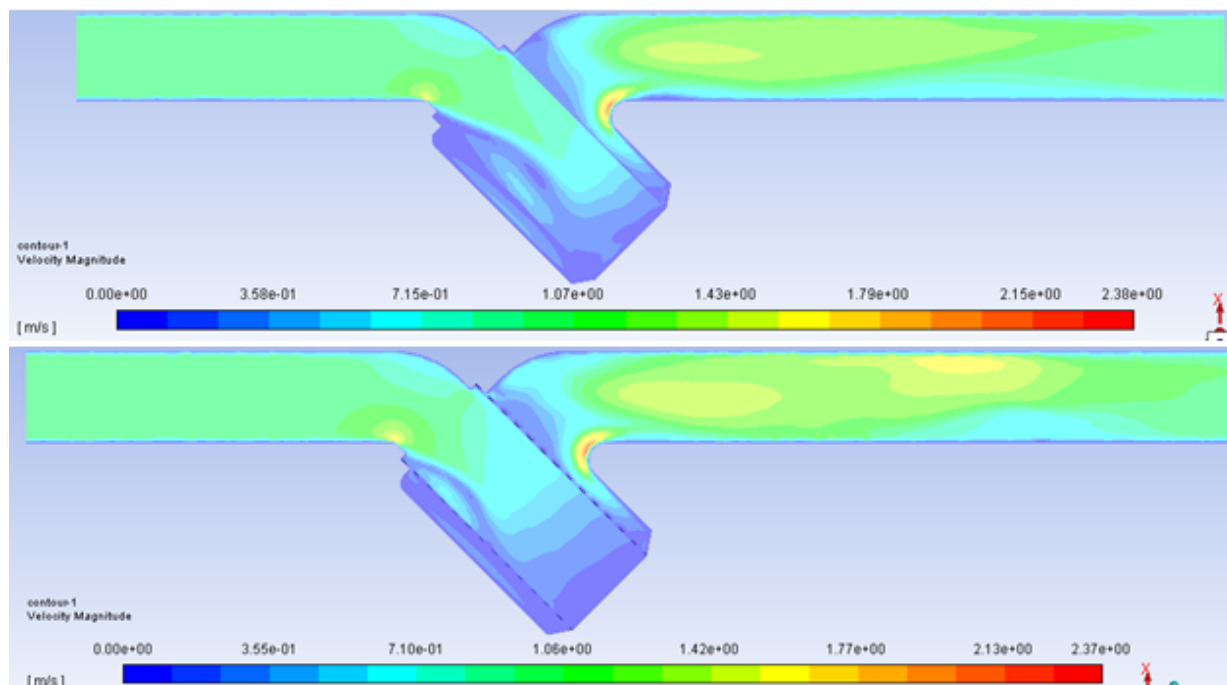
Obrázek 8.19 – Překrytí klece způsobující další odpor

Jak ukazuje obrázek 8.19, překrytí způsobuje omezení asi poloviny průtočné plochy opěrné klece, což může při umístění tak, že toto omezení zasahuje do hlavního proudění ze síta, způsobit značnou tlakovou ztrátu. Podobný průběh, tak lze očekávat i v případě síta 4.



Obrázek 8.20 Vektory rychlosti při rychlosti proudění  $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (scale 15, skip 30)

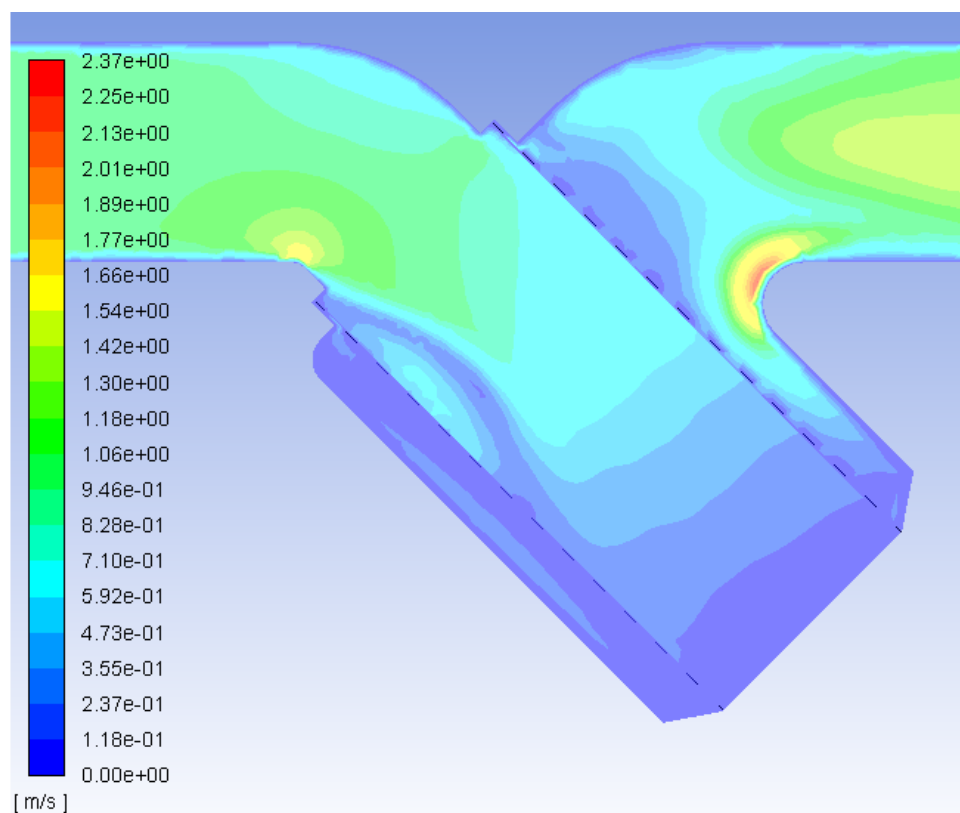
Vektory rychlosti se zásadním způsobem od předchozích případů neliší, klec tak pouze dále sníží rychlost proudění ze síta. Zavíření, které bylo zachyceno na obrázcích 8.17 a 8.18 zde není z důvodu zpomalení kapaliny sítím, do klece tak kapalina naráží menší rychlostí a zavíření tedy nevznikne.



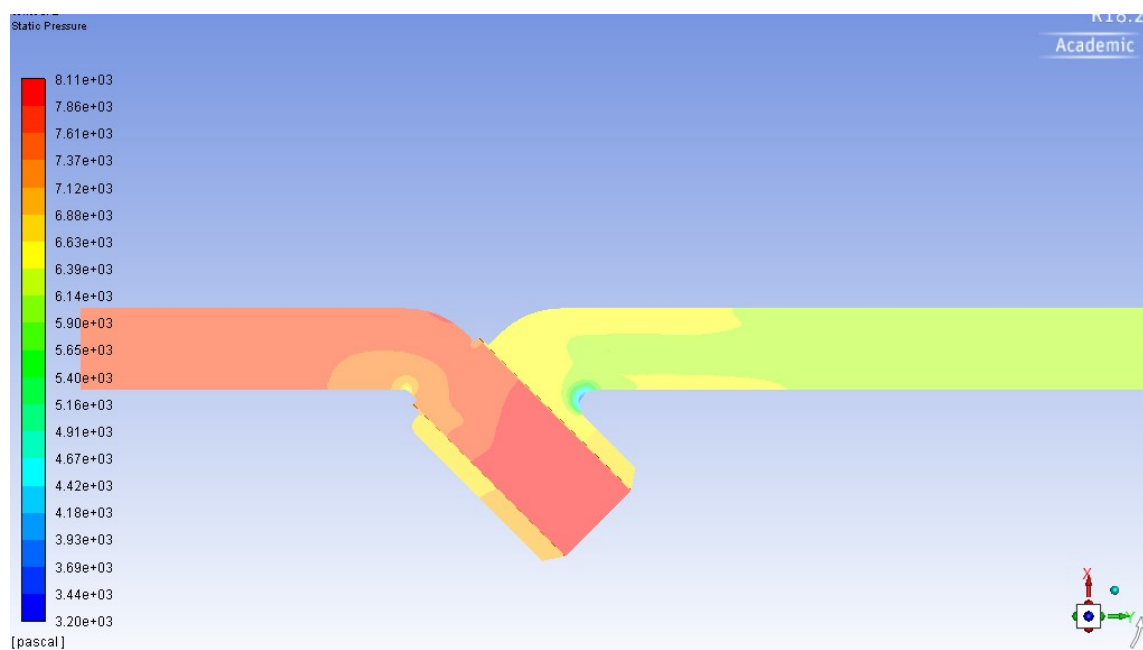
*Obrázek 8.21 – Srovnání kontury rychlosti, rychlost proudění  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (nahore bez klece – síta 1, dole s klecí – síta 3)*

Na obrázku 8.21 lze vidět, že v kombinaci se sítím nedochází ve srovnání s předchozími sítími bez klece k velké změně. Jak již bylo zmíněno, síto proudění zpomalí natolik, že při průchodu klecí nedojde k žádným výrazným zavířením.

V detailu na obrázku 8.22 je stále patrné obtékání klece, za klecí se tak utvářejí oblasti velmi pomalu proudící kapaliny.



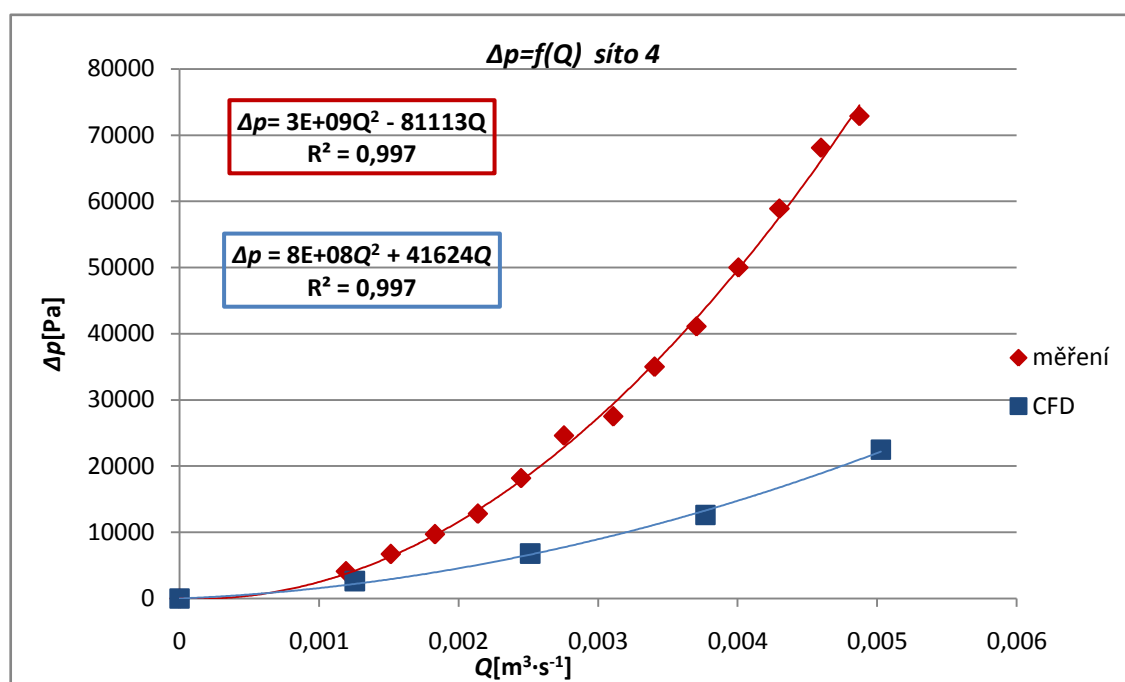
Obrázek 8.22 – Detail kontur rychlosti, rychlost proudění  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 8.23 – Kontury statického tlaku, rychlost proudění  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Kontury statického tlaku se od předchozích případů liší v sítu, kde se vlivem většího odporu utváří vyšší tlak, na výstupu se naopak tlak snížil.

## 8.6 Vyhodnocení síta 4, s opěrnou klecí



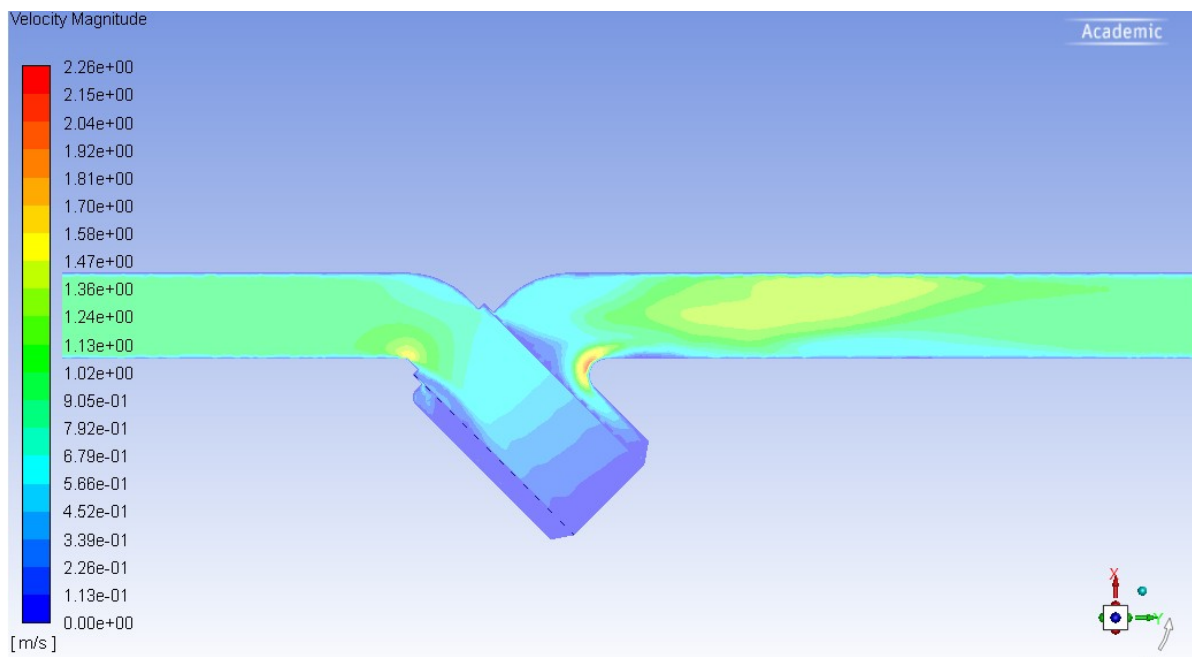
Graf 8.5 – Srovnání  $\Delta p - Q$  charakteristik, síto 4

$Q$	$v$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$\Delta p_{\text{změřená}}$
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{bar}]$	$[\text{Pa}]$
0,001257	1	6150	3502	2648	4100
0,002513	2	18504	11707	6797	18200
0,00377	3	33036	20398	12638	41100
0,005027	4	74269	51778	22491	72900

Tabulka 8.8 – Srovnání tlakových ztrát

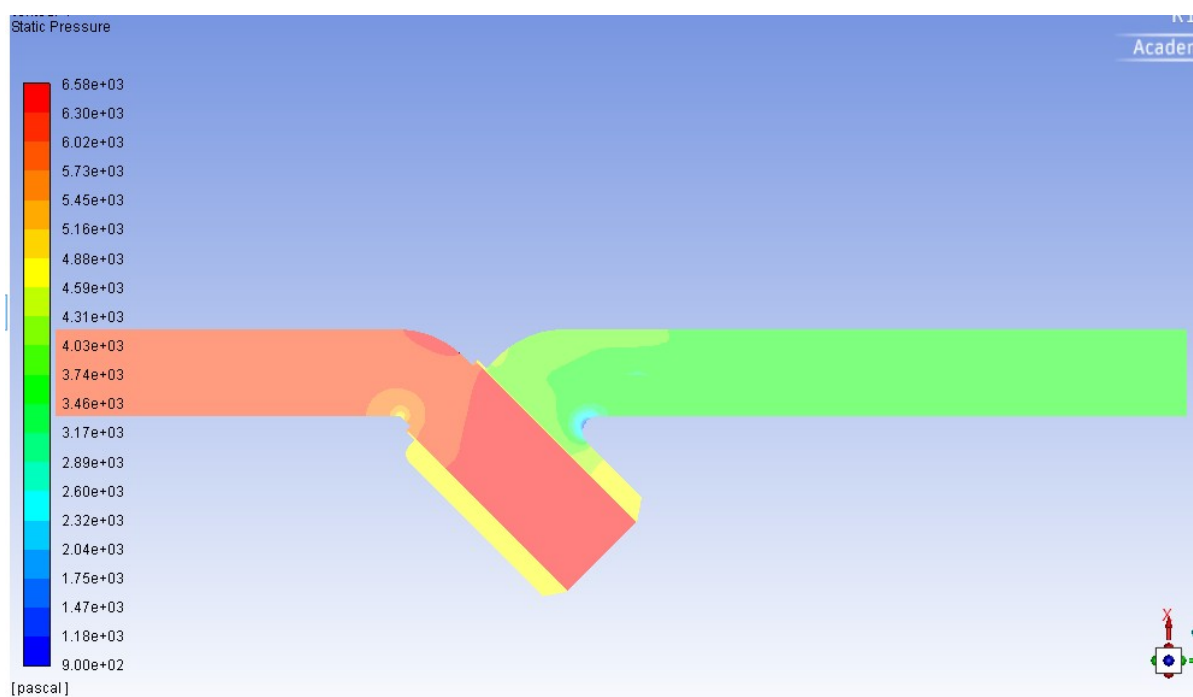
Tlaková ztráta ze simulace tedy nedosahuje hodnot jako v případě měření. Vzhledem ke stejné konstrukci opěrné klece, viz obrázek 8.19, není možné dosáhnout naprosto přesné simulace. Na základě vyšší propustnosti tohoto síta by tlaková ztráta měla být nižší než v předchozím případě, ale vzhledem k metodice stanovení permeability odpovídá simulace měření, to tedy znamená, že síto 4 generuje větší tlakovou ztrátu i v jejím případě. Při měření tak pravděpodobně došlo k vložení síta do armatury tak, že se opěrná klec překrývala přímo v místech, kde dochází k největším výstupům kapaliny ze síta, to znamená, jak lze vidět z grafických vyhodnocení, ve směru proudění.

Vzhledem k velmi podobným grafickým vyhodnocením vektorů rychlosti zde přidávám pouze kontury rychlosti a statického tlaku.



Obrázek 8.24 Kontury rychlosti, rychlost proudění  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na konturách rychlosti lze vidět jiný rychlostní profil v sítu a na výstupu z něj, zároveň se rychlosti snížily ve všech oblastech vlivem většího odporu kladeného sítím.

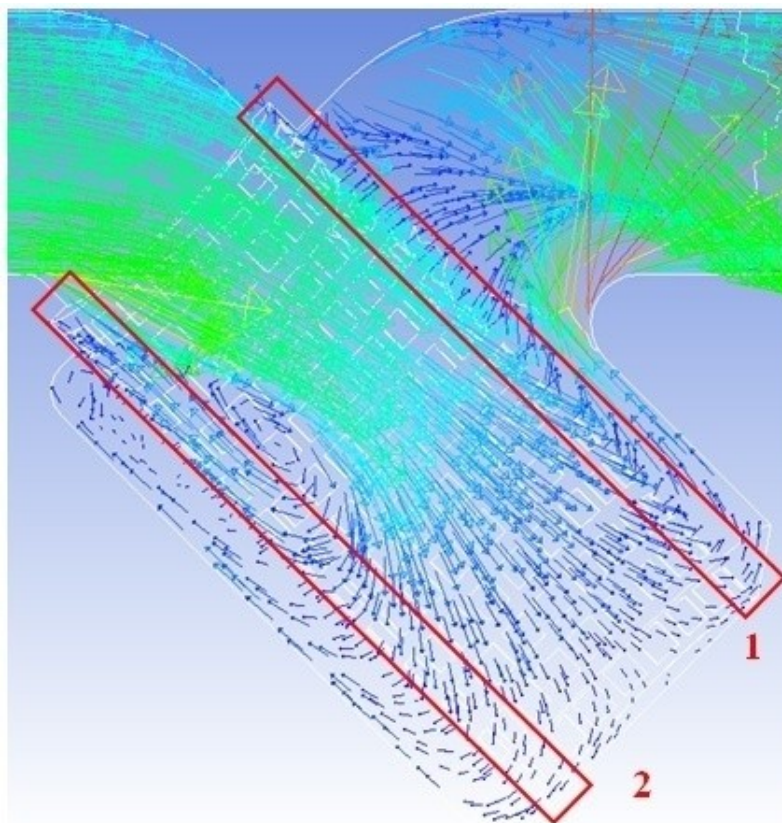


Obrázek 8.25 Kontury statického tlaku, rychlost proudění  $v = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na konturách statického tlaku lze vidět, že se v celé oblasti před sítím zvýšil tlak, ve srovnání se sítím 3 lze vidět větší rozdíl tlaků na vstupu a výstupu.

### **Zhodnocení simulace ve srovnání s měřením:**

Z vyhodnocení simulací a jejich srovnání s měřeními vyplývá, že pro případ prázdné armatury a síť bez klece došlo k dobré shodě s měřením, odchylky v tlacích mohou být způsobeny 3D modelem, který nemusí zcela kopírovat skutečný tvar armatury. V případě sít s klecí je odlišnost výsledků experimentálního měření a numerického modelování zřejmě ovlivněna konstrukcí klece, která je obtížně řešitelná pomocí 3D modelování. Obecnou nevýhodou řešení sít ve Fluentu je nutnost provést měření pro zjištění tlakové ztráty. Přínosem je pak lepší pochopení proudění armaturou se sítí což umožňuje snadnější optimalizaci celého filtru. Řešením sít s klecí se pak ukázalo, z jakého důvodu pravděpodobně došlo u síta 4 k vyšším tlakovým ztrátám než v případě síta 3. Na základě tohoto zhodnocení lze pak doporučit montáž sít s klecí tak, aby se překrývající část klece nacházela proti proudění, viz obrázek 8.26 (1 – nevhodné překrytí, 2 – vhodné překrytí).



*Obrázek 8.26 – Umístění překrytí*

## **Závěr:**

Cílem této práce bylo na základě požadavku firmy ARMATURY Group a.s. zjistit tlakovou ztrátu přírubového filtru *D71 118 540 DN 40* s různými variantami sít. Stanovení tlakové ztráty proběhlo měřením na experimentální trati Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení a dále pak simulací pomocí CFD modelování.

V práci je uveden základní popis armatur a jejich funkce. Podrobně je pak popsán přírubový filtr, který slouží k odstranění hrubých nečistot z kapaliny. Je uveden jeho popis a příklad veličin, které jsou součástí katalogů a zachycují vlastnosti filtru.

Teoretická část práce se dále zabývá místními ztrátami, mezi které tyto filtry patří. Popisuje jak způsob jejich měření, tak veličiny, které jsou hodnoceny. Jedná se především o tlakovou ztrátu ( $\Delta p - Q$  charakteristiku) a hodnoty z těchto tlakových ztrát odvozené, především pak ztrátový součinitel  $\zeta$  v závislosti na Reynoldsově čísle.

Vzhledem k předpokladu řešení filtračních sít v ANSYS – Fluent (CFD) jako porézního prostředí je další kapitola zaměřena na problematiku tlakových ztrát v tomto prostředí. Jsou uvedeny základní pojmy týkající se porézních prostředí jako Darcyho zákon, propustnost  $\varepsilon_P$  a výpočet tlakové ztráty v tomto prostředí.

V následující kapitole byly stručně uvedeny základy CFD, včetně bilančních rovnic popisujících proudění. V rámci této kapitoly je pak podrobněji přiblížen systém ANSYS – Fluent, ve kterém byla později provedena simulace a dále pak ANSYS *SpaceClaim*, za pomoci kterého byla upravována geometrie.

Problematika řešení porézního prostředí v ANSYS Fluent je shrnuta v další kapitole, v této kapitole jsou tak popsány dva způsoby, kterými lze k modelování tohoto prostředí přistoupit, a to jako k poréznímu skoku (Porous – Jump) a k porézní oblasti (Porous – Zone).

Následně je již popsáno měření filtru *D71 118 540 DN 40* provedené v laboratoři VŠB – TUO, katedry Hydromechaniky a hydraulických zařízení. Měření bylo provedeno na trati zachycené na obrázku 6.1 a 6.2. Během měření byl snímán tlak před a za filtrem, dále byl snímán průtok do něj vstupující. Měření bylo prováděno za zvyšujícího se průtoku (pomocí změny otáček čerpadla), rychlost průtoku se pohybovala v rozmezí od  $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $v = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Detailní popis použitých prvků je i s jejich specifikací uveden, spolu s postupem měření v kapitole 6. V kapitole se rovněž nacházejí specifikace s obrázky jednotlivých sít (obrázky 6.7 až 6.10). Postupně bylo provedeno 5 variant měření jako první prázdné



armatury bez síta, následovalo měření se 4 variantami sít, 2 z těchto sít byly opatřeny opěrnými klecemi.

Vyhodnocení měření bylo provedeno v programu Microsoft Excel pomocí tabulek a grafů. Byla tak vyhodnocena závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  ( $\Delta p - Q$  charakteristiky) a závislost ztrátového součinitele  $\zeta$  na Reynoldsově číslu. Vyhodnocení probíhalo dle měření, tedy jako první prázdná armatura, pak následovala řešení se sít. Prázdná armatura po vyhodnocení vykázala nejnižší tlakovou ztrátu spolu s nejnižšími ztrátovými součiniteli při srovnatelných rychlostech. Hodnota ztrátového součinitele dosáhla průměrné hodnoty  $\zeta = 1,49$ . Vyhodnocením síta 1 (síto s největší propustností) byla zjištěna tlaková ztráta, která nebyla významně vyšší než prázdné armatury, a to hlavně při nejmenších rychlostech proudění. Tato skutečnost se následně promítla i do ztrátového součinitele, kdy pro toto síto dosahoval průměrné hodnoty  $\zeta = 2,15$ . Pro následující síto 2 (síto s menší propustností) nebyla při nízkých rychlostech tlaková ztráta příliš odlišná od prázdné armatury, se zvyšující se rychlostí pak postupně docházelo ke strmějšímu nárůstu tlakové ztráty  $\Delta p$ , při rychlosti proudění  $v = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  tak tlaková ztráta dosahovala téměř dvojnásobné hodnoty. Ztrátový součinitel dosáhl průměrné hodnoty  $\zeta = 2,37$ . Vyhodnocením síta 3 (síto s opěrnou klecí s nižší propustností) byla zjištěna tlaková ztráta značně převyšující předchozí síta, tato skutečnost je dána jak nižší propustností, tak konstrukcí opěrné klece. Ztrátový součinitel dosáhl průměrné hodnoty  $\zeta = 4,17$ . V případě síta 4 (síto s opěrnou klecí s vyšší propustností než síto 3) byla vyhodnocením zjištěna nejvyšší tlaková ztráta, výrazně převyšující jak síta 1 a 2 tak síto 3. Této tlakové ztrátě pak odpovídal i ztrátový součinitel dosahující průměrné hodnoty  $\zeta = 9,48$ . Důvod této vysoké tlakové ztráty je pak nastíněn po řešení simulací v kapitole 8.

Kapitola 7 se věnuje nastavení výpočtového modelu v programu ANSYS Fluent. Nejprve je nastíněna úprava geometrie síta, v první řadě pomocí CAD softwaru Creo Parametric 3.0, kde došlo k prvotní úpravě 3D geometrie zaslané firmou ARMATURY Group a.s. ve formátu \*.STEP. Bylo nutno upravit 3D model tak, aby co možná nejvíce kopíroval skutečný tvar armatury, k úpravě došlo ve vnitřní části v oblasti výstupu z filtru, kde bylo nutno vytvořit zaoblení (viz obrázek 7.2), které se v zaslaném modelu nenacházelo. Skutečná armatura však toto zaoblení má. Dále byla upravena opěrná klec. Následně byl 3D model importován do programu ANSYS – *SpaceClaim*, který sloužil ke konečné úpravě geometrie k simulaci proudění. Geometrie byla rozdělena na jednotlivé plochy, především vnější části modelu byly odstraněny, vstup i výstup z armatury byly prodlouženy v případě vstupu na přibližně na dvojnásobek a v případě výstupu na šestinásobek jmenovité světlosti



armatury DN40. Následovalo uzavření objemu na 3 části, pro případ nutnosti síťování prodlouženého vstupu a výstupu zvlášť. Dále byla upravená geometrie symetricky rozdělena. Tímto byla vytvořena geometrie pro základní úlohu simulace – prázdnou armaturu. Dále bylo nutno vytvořit síto, a to pomocí plného válečku, kdy bylo nutno objem, ve kterém se váleček nachází nejprve odstranit a následně do tohoto prázdného objemu váleček vložit jako samostatný objekt. Podobným způsobem byla řešena i opěrná klec.

Dále byla vytvořena síť, kdy se po různých variantách nejvíce osvědčila síť tvořená 4 stěny ve všech oblastech, kromě síta, v jeho případě se osvědčily 6 stěny. Konečný počet elementů je pak 454 427. K hodnocení kvality sítě sloužil parametr *skewness* (jak blízko je tvar buňky k ideálnímu tvaru), tato hodnota se v případě této sítě pohybovala průměrně okolo 0,22. To vypovídá o malém počtu zdeformovaných buněk. V rámci tvorby sítě byly také pojmenovány okrajové podmínky, pojmenování bylo tvořeno tak, aby odpovídalo předpokládanému typu okrajové podmínky (symmetry = osa symetrie). Přímou ve Fluentu pak byly definovány okrajové podmínky, vstup byl řešen jako hmotnostní průtok odpovídající měřením (výpočet byl proveden vždy pro rychlosti proudění  $v = 1; 2; 3$  a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Na výstupu pak byl definován výstupní tlak (pressure outlet) zjištěný měřením. Síto bylo definováno jako tzv. poremní skok (Porous – Jump, definováno v Boundary Condition) nebo jako poremní oblast (Porous – Zone, definováno v Cell Zone Conditions). V obou případech byla pro definování důležitá hodnota permeability sítě, k jejímu zjištění byly užity 3 přístupy srovnané v kapitole 8, jejich výpočet je uveden v kapitole 7. Po modelování různých variant byl vybrán turbulentní dvou-rovnicový model  $k - \varepsilon$  standardní, se standardní stěnovou funkcí. Kompletní nastavení modelu je popsáno v kapitole 7.

Vyhodnocena byla jako první prázdná armatura, kde byl v příčných řezech odpovídajících odběrům tlaku při měření vyhodnocován statický tlak a to pro určení tlakové ztráty ze simulace. V případě prázdné armatury byla zjištěna dobrá shoda s měřením, odchylky mohly být způsobeny ne zcela přesným 3D modelem armatury. Grafickými výstupy pak byly vyhodnoceny vektory rychlosti v celé oblasti, kontury rychlosti a statického tlaku. Bylo zjištěno, že vlivem zakřivení do oblasti umístění síta dojde k omezení průřezu hlavního toku kapaliny a tak k jejímu urychlení a zavírání. Zároveň se v tomto místě tvoří oblast zvýšeného tlaku, jedná se tedy největší zdroj tlakové ztráty v prázdné armatuře. Následně byly vyhodnoceny možnosti definice síta (Porous – Jump, Porous – Zone) a permeability, kde se nejvíce osvědčilo definovat síto jako poremní oblast v Cell Zone Condition (Porous – Zone). Výpočet permeability se nejvíce osvědčil vyjádřením ze vzorce pro výpočet tlakové ztráty v tenké poremní vrstvě (vztah 5.6). Tyto možnosti definice byly

vybrány na základě nejlepší shody naměřené tlakové ztráty a výsledku simulací v ANSYS – Fluent pro síto1 a dále pak byly použity na zbylých sítích. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost provést pro zjištění permeability  $\alpha_P$  experimentální měření.

V případě sít 1 a 2, tedy sít bez opěrné klece, došlo k dobré shodě s měřením, při vyšších rychlostech proudění se především u síta 2 rozdíl měření a simulace zvětšil, kdy v případě Fluentu byla určená tlaková ztráta nižší. Grafické výstupy byly vyhodnoceny stejně jako v případě prázdné armatury, ukázalo se, jakým způsobem síta proudění ovlivňují. Vlivem odporu, který kladou, dojde k ovlivnění jak směru proudění, tak jeho rychlosti. Na vektorech rychlosti je tak vidět, jak je proud směřován více do prostoru síta. Po výstupu ze síta je rychlost proudění snížena, vlivem toho se tak sníží i zavíření ve výstupu z armatury. Na konturách statického tlaku jde vidět, že tlaková ztráta se nejvíce utváří právě v sítu, které klade nejvyšší odpor. V případě sít 3 a 4 je jako první vyhodnocena varianta pouze s klecí pro lepší představu toho, jak proudění ovlivňuje, z kontur rychlosti je pak viditelné obtékání elementů klece a následné zavíření na výstupu z armatury. Vyhodnocením variant se síty pak nebylo dosaženo tlakové ztráty tak vysoké jako v případě měření, a to hlavně v případě síta 4, to bylo pravděpodobně způsobeno skutečným tvarem opěrné klece, která se v jedné části překrývá a tím dochází ke zvýšené tlakové ztrátě, viz obrázek 8.19. Grafickým vyhodnocením bylo potvrzeno, že vlivem zpomalení proudění v sítu dojde k potlačení vlivu opěrné klece a nedojde tak k zavíření na výstupu.

Výsledkem práce jsou tak vyšetřené  $\Delta p - Q$  přírubového filtru při použití specifikovaných sít. Dále pak vytvoření metodiky pro definování těchto sít v programu ANSYS – Fluent a vyšetření tlakových ztrát i za pomoci CFD modelování. Grafické vyhodnocení proudění uvnitř filtru ukazuje, že síto má mimo jiné i vliv na usměrnění proudění, kdy vlivem poklesu rychlosti nedojde k výraznému zavíření na výstupu z armatury. Dále lze na základě grafických zhodnocení doporučit pečlivou montáž sít s klecí, kde je vhodné vyhnout se montáži tak, aby byla překrývající se část klece umístěna v oblasti, kde dochází k hlavnímu výstupu kapaliny ze síta (viz obrázek 8.26).

## Použitá literatura:

1. DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-10-25]. ISBN 978-80-248-1508-4.
2. VRÁNA, PH.D., Ing. Jakub. *Vliv místních odporů na tlakové ztráty v potrubí* [online]. 23.4.2012 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/teorie-voda-kanalizace/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubu>
3. JANALÍK, Jaroslav. *HYDRODYNAMIKA A HYDRODYNAMICKÉ STROJE*. Ostrava, 2008.
4. KOLÁŘ, INŽ. Václav a Stanislav VINOPAL. *Hydraulika průmyslových armatur: Příručka praktických výpočtů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
5. FILTRY ŠIKMÉ. In: [Http://www.ibcp Praha.cz](http://www.ibcp Praha.cz): *FILTRY ŠIKMÉ* [online]. Jinočany, Czech Republic, 2009, 12/2009 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <http://www.ibcp Praha.cz/wp-content/uploads/2016/08/kat-str-y-cz.pdf>
6. POLÁŠEK, Viktor. Určení odporu porézního prostředí. Ostrava, 2012. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Marian Bojko, Ph.D.
7. KEMEL, M. Hydrologie. České vysoké učení technické, Praha, 1985.292s.
8. Fine civil engineering software, fine.cz, [online]. 2007 [cit. 2018-02-16] Dostupné z WWW: <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/koefficient-filtrace-01/>
9. *Momentum Equations for Porous Media* [online]. 2009 [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node233.htm>
10. JAHODA, M. Počítačová dynamika tekutin – užitečný nástroj pro inženýry [online]. In:s 38 [cit 2017-12-02]. Dostupné z: [http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni\\_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf](http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf)
11. SOUČKOVÁ, Natálie, Petr KOLÁŘ a Antonín TUČEK. Simulace proudění tekutin pomocí CFD[online]. 2013 [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>
12. PROVAZNÍKOVÁ, MARTINA. *NÁVRH HLAVY VÁLCE TYPU TRIFLUX PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR*. BRNO, 2008. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. DAVID SVÍDA.
13. KOZUBKOVÁ, M. a kolektiv.: *Návody pro laboratorní měření z mechaniky tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2007

14. HAVLÍK, CSC, Doc. Ing. Aleš a Ing. Tomáš PICEK PHD. *Hydraulika potrubí* [online]. 2008, 65 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_04\\_Hydraulika\\_potrubí.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubí.pdf)
15. *Porous Media Conditions* [online]. 2016 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_bc\\_porous\\_media.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_bc_porous_media.html)
16. KOZUBKOVÁ, Milada, Jaroslav KRUTIL, Marian BOJKO a Otto DVOŘÁK. *MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VÝBUCHU METANU V RODINNÉM DOMKU V KAMENNÉ POMOCÍ SW FLUENT* [online]. In: . 5.5.2012, s. 24 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/13/99.pdf>
17. *Darcy's Law in Porous Media* [online]. 2016 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_bc\\_porous\\_media.html#flu\\_ug\\_eq\\_porous\\_std](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_bc_porous_media.html#flu_ug_eq_porous_std)
18. *ANSYS SpaceClaim Direct Modeler* [online]. 2013 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/produkty/geometrie-a-sit/ansys-spaceclaim>
19. *HacocWilo-HELIX V1608* [online]. In: [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.magazin-nasosov.ru/product/nasos-wilo-helix-v1608-116e400-50/>
20. *Skewness* [online]. 2016 In: [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_skewness.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html)
21. Ing. Jiří Doubrava, Ing. Vlastimil Dytrt, Ing. Michal Klimeš, Ing. Vladimír Marek, Ing. Oldřich Novotný, Ing. Tomáš Suchánek, Ing. Milan Šalda. *REGULAČNÍ ARMATURY 4. upravené a doplněné vydání. LDM, spol. s r.o. 560 02 Česká Třebová*
22. <http://www.armaturkakrnov.cz> [online]. Praha: I.B.C. PRAHA spol. s r.o., 2009 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.armaturkakrnov.cz/wp-content/uploads/2014/05/kat-str-y-cz.pdf>
23. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů. Skripta. VŠB –TU Ostrava, 1995, 152 s.*
24. BOJKO, M. *3D Proudění – ANSYS Fluent, učební text. VŠB – TU Ostrava, 2012, 314s.* Dostupné na: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
25. RODI, W., FUEYO, N. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments. Spain, 2002. 1009 s. ISBN 0-08-044114-9.*
26. BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentu ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů. [online]. Dostupné z <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>. Firemní literatura.*

27. JANDOVÁ, Tereza. Hydrodynamické a termální modelování reaktivního toku v okolí intruzí. Praha, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. David Dolejš, Ph.D.
28. Darcyho zákon. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2016 [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Darcyho\\_z%C3%A1kon](https://cs.wikipedia.org/wiki/Darcyho_z%C3%A1kon)
29. KOZUBKOVÁ, Milada. Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Ostrava: VŠB-TUO, 2008.
30. PN 16 [online]. 2010 [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <http://www.hauserarmatury.cz/dokumentace.php?rd=ostatni/d71118616>
31. STAINLESS STEEL Y STRAINER PN16 [online]. 2015 [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: [http://www.sferaco.fr/vdoc/thermador/SOC5/eng\\_bd\\_fta230.pdf](http://www.sferaco.fr/vdoc/thermador/SOC5/eng_bd_fta230.pdf)

## **Přílohy na CD**

A – Výpočtový Excel